

生体スルメイカの光感覚と漁灯の発光特性に関する研究

著者	小川 翼
学位名	修士(海洋科学)
学位授与機関	東京海洋大学
学位授与年度	2014
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00001446/

修士学位論文

生体スルメイカの光感覚と
漁灯の発光特性に関する研究

平成 26 年度
(2015 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海洋生命科学専攻

小川 翼

2014 年度 修士論文
生体スルメイカの光感覚と漁灯の発光特性に関する研究 小川 翼
目次

図表リスト

第 1 章 緒言	1
第 2 章 ERG(網膜電位図)による生体スルメイカの分光視感度測定	3
2-1 試料および方法	3
2-1-1 実験実施時期・施設	
2-1-2 供試スルメイカ	
2-1-3 実験装置	
2-1-3-1 LED 光刺激装置・ND フィルター	
2-1-3-2 網膜電位記録装置	
2-1-4 実験方法	
2-1-5 解析方法	
2-1-5-1 光覚閾値と分光視感度	
2-1-5-2 応答振幅	
2-2 結果	12
2-2-1 光覚閾値と分光視感度	
2-2-2 応答振幅	
2-3 考察	18
第 3 章 漁灯光による船下・船周の光環境とスルメイカの光感覚	21
3-1 試料および方法	21
3-1-1 海水の分光透過特性	
3-1-2 船下・船周における漁灯光の分光分布とスルメイカの感知限界深度	
3-2 結果	25
3-2-1 海水の分光透過特性	
3-2-2 船下・船周における漁灯光の分光分布とスルメイカの感知限界深度	
3-3 考察	36
第 4 章 総合考察	38
謝辞	42
参考文献	43
巻末資料	46

図表リスト

第 2 章 ERG 測定実験

- 図 2-1 実験実施施設(北海道大学水産科学研究院)
- 図 2-2 実験実施施設(オホーツク活魚の臨海活魚施設)
- 図 2-3 実験実施施設(函館市国際水産・海洋総合研究センター水槽室)
- 図 2-4 実験用暗室
- 図 2-5 測定台
- 図 2-6 供試スルメイカの外套長と体重との関係
- 図 2-7 ERG 測定用 LED 光源
- 図 2-8 LED 光源の発光制御用電源
- 図 2-9 刺激光制御と網膜電位記録用の AD 変換機
- 図 2-10 光量子束密度測定図
- 図 2-11 ND(Neutral Density)フィルター
- 図 2-12 LED 刺激光別の分光分布
- 図 2-13 ND フィルターの分光透過率
- 図 2-14 電位変化増幅用アンプ
- 図 2-15 暗室構造の小型水槽
- 図 2-16 測定台上にセットしたスルメイカ
- 図 2-17 眼球と体表に接触させた電極
- 図 2-18 スルメイカの応答波形の PC 記録例
- 図 2-19 ERG の測定過程
- 図 2-20 557nm ピークの刺激光に対するスルメイカの応答波形
- 図 2-21 スルメイカの光覚閾値
- 図 2-22 スルメイカの分光視感度
- 図 2-23 スルメイカの分光視感度(縦軸対数)
- 図 2-24 スルメイカの光覚閾値と近似曲線
- 図 2-25 420nm の刺激光に対するスルメイカの応答振幅と PFD 積分値との関係
- 図 2-26 461nm の刺激光に対するスルメイカの応答振幅と PFD 積分値との関係
- 図 2-27 493nm の刺激光に対するスルメイカの応答振幅と PFD 積分値との関係
- 図 2-28 525nm の刺激光に対するスルメイカの応答振幅と PFD 積分値との関係

- 図 2-29 557nm の刺激光に対するスルメイカの応答振幅と PFD 積分値との関係
図 2-30 609nm の刺激光に対するスルメイカの応答振幅と PFD 積分値との関係
図 2-31 LED 刺激光に対するスルメイカの応答振幅と PFD 積分値との関係
図 2-32 LED 刺激光に対するスルメイカの応答振幅と PFD 積分値との関係(縦軸相対値)
図 2-33 スルメイカの分光視感度と視物質の吸光度

表 2-1 LED 刺激光の特性

表 2-2 LED 光源の設定電流値

第 3 章 釣獲深度の光環境とスルメイカの光感覚

- 図 3-1 深度と PFD 積分値との指数近似曲線 (LED40kW, 舷側距離 20m)
図 3-2 深度と PFD 積分値との関係 (LED40kW, 舷側距離 20m)
図 3-3 深度と PFD 積分値との関係 (LED40kW, 舷側距離 20m, 縦軸対数)
図 3-4 計算から求めた分光分布 (LED40kW, 舷側距離 20m, 深度 40m)
図 3-5 透過距離別 海水の分光透過率
図 3-6 天空光の分光分布(表層, $X=1$)
図 3-7 天空光の分光分布(深層, $X=1$)
図 3-8 天空光の分光分布(表層, $X=2$)
図 3-9 天空光の分光分布(深層, $X=2$)
図 3-10 海中に透過した天空光の PFD 積分値と深度との関係
図 3-11 石川県小木沖における海水の透過率(2009 年 5/12)
図 3-12 石川県小木沖における深度と透過率との関係(496nm, 2009 年 5/12)
図 3-13 海中に透過した 496nm の PFD と深度との関係
図 3-14 PFD 積分値等値線と感知限界深度(LED40kW)
図 3-15 PFD 積分値等値線と感知限界深度(MH246kW)
図 3-16 舷側距離 40m・深度 0m における LED40kW, MH246kW の分光分布
図 3-17 舷側距離 40m・深度 40m における LED40kW, MH246kW の分光分布
図 3-18 舷側距離 80m・深度 40m における LED40kW, MH246kW の分光分布
図 3-19 PFD 積分値等値線と感知限界深度(LED40kW+MH90kW)
図 3-20 舷側距離 40m・深度 0m における LED40kW+MH90kW の分光分布

図 3-21 舷側距離 40m・深度 40m における LED40kW+MH90kW の分光分布

図 3-22 舷側距離 80m・深度 40m における LED40kW+MH90kW の分光分布

図 3-23 各舷側距離の深度 0m における 1kW あたりの PFD 積分値

図 3-24 舷側距離 40m における深度別の 1kW あたりの PFD 積分値

図 3-25 舷側距離 80m における深度別の 1kW あたりの PFD 積分値

表 3-1 第 18 白嶺丸の漁灯光測定条件

第 4 章 総合考察

図 4-1 漁灯光の分光分布とスルメイカの分光視感度(舷側距離 40m・深度 40m, 相対値)

図 4-2 スルメイカの分光視感度と天空光の海中分光分布の相対値

図 4-3 スルメイカの光覚閾値と天空光の海中分光分布

図 4-4 PFD 積分値が $0.01 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ となる深度

巻末資料

補足図 1 平均処理によるノイズ量の変化(493nm, ND8×6 条件)

補足図 2 増幅前の電位変化(493nm, ND8×6 条件)

第 1 章 緒言

眼球の通光系から入射してくる光量子は網膜の最外層にある視細胞の外節に達し、そこで視物質に光化学反応をおこす結果、視細胞電位が発生し視覚の初期過程が始まる。¹⁾ 網膜の活動電位を記録する方法として、眼球に電極を接触させる ERG (Electroretinogram, 網膜電図) がある。ERG は光の照射 (オン反応) と消滅 (オフ反応) に関して波形をもつ電位変化であり、ERG の波形は刺激となる光の強さ、波長などによって変化する。²⁾ これにより、従来は動物の行動ないし心理学的方法でしか知り得なかった眼の感受性を客観的なものとして知ることができ、視覚機能と生態あるいは行動との関連を研究する際に有効な手段である。²⁾

夜間のイカ釣り操業では、灯光を利用して対象種であるスルメイカ *Todarodes pacificus* を集めて釣獲している。³⁾ 操業では主にメタルハライド (MH) 灯が漁灯として用いられているが、海中での減衰が著しい長波長域の可視光や赤外線、さらには紫外線も多く放射しており、⁴⁾ 漁灯としてはエネルギーロスが大きい。一方、LED には発光波長を選択できるという利点があり⁴⁾、スルメイカが高い感度を示す波長を用いることで、エネルギーロス、ランニングコストの低減につながるものと考えられる。スルメイカの光感覚については、対光行動実験⁵⁾、視物質の吸光度測定^{6, 7)}などの研究があるが、生体のスルメイカを対象とした ERG 測定に関する研究例は少なく、スルメイカの可視光域や分光視感度などに関する知見は十分ではない。

本研究では、スルメイカの光感覚特性を明らかにし、漁灯の波長・光量などの発光特性に応用するために生体スルメイカの ERG 測定をおこない、その結果を船下・船周における夜間の漁灯光および昼間の天空光の海中分光分布測定の既得値と照合しスルメイカが漁灯光を感知できる範囲を調べた。

第 2 章では、ピーク波長が 380~729nm の間にある 22 種の LED 光源から刺激光を得て生体スルメイカの ERG 測定をおこない、電位変化を発生させる最小の光量である光覚閾値、波長別の感度を表す分光視感度、電位変化の度合いを表す応答振幅を求めた。

第 3 章では、天空光の海中分光分布から海水の分光透過率を求め、これと漁灯光測定の既得値からイカ釣り漁船周囲における漁灯光の海中分光分布を推

定し，第 2 章で求めたスルメイカの光覚閾値と照合することで，スルメイカが漁灯光を感知できる範囲を求めた。

第 4 章では，2，3 章の結果からスルメイカの光感覚が生態およびイカ釣り操業においてどのような役割をもっているのかを考察し，海水の透過率とスルメイカの光感覚の両面から，イカ釣り漁業に適した漁灯光の波長・光量などについて検討した。

第 2 章 ERG(網膜電位図)による生体スルメイカの分光視感度測定

本章では，ERG 測定によって光覚閾値，分光視感度，応答振幅などの生体スルメイカの光感覚特性について調べた。その結果を視物質の吸光度や魚類など他生物の光感覚と比較し，スルメイカの光感覚の特性について論議した。

2-1 試料および方法

2-1-1 実験実施時期・施設

実験は，2013 年 11 月 19～30 日に北海道函館市の北海道大学水産科学研究院の実験棟(図 2-1)内，2014 年 10 月 26～27 日に北海道枝幸郡の株式会社オホーツク活魚の臨海活魚施設(図 2-2)内，2014 年 11 月 10～19 日に北海道函館市の国際水産・海洋総合研究センター(図 2-3)水槽室内に設置した暗室(図 2-4)でおこなった。暗室内にはさらに小型の暗室を作り，その中に ERG 測定台(図 2-5)を設置して，実験光以外の光が入らないようにした。



図 2-1 北海道大学水産科学研究院実験棟



図 2-4 実験用暗室
(図 2-2 の施設内の設置例)



図 2-2 オホーツク活魚の臨海活魚施設



図 2-3 函館市国際水産・海洋総合研究センター
水槽室



図 2-5 ERG 測定台

2-1-2 供試スルメイカ

函館における実験では操業を終えた小型イカ釣り漁船(豊進丸 9.7GT)の活イカ水槽から供試個体を採取し、枝幸における実験では小型漁船(第 28 正福丸 14GT)の底定置網操業の漁獲物取り込み段階において活スルメイカを採取した。スルメイカはビニール袋に海水を張ったペールに移しエアレーションをおこない、実験施設内の水槽まで移送した。分光視感度、応答振幅のサンプリングとデータ解析に供したスルメイカ 16 個体(N)の外套長と体重との関係を図 2-6 に示した。このうち 2 尾は雄の成熟個体、14 尾は雌の未成熟個体であった。16 尾中 9 尾は光覚閾値と分光視感度、7 尾は応答振幅の測定に供した。

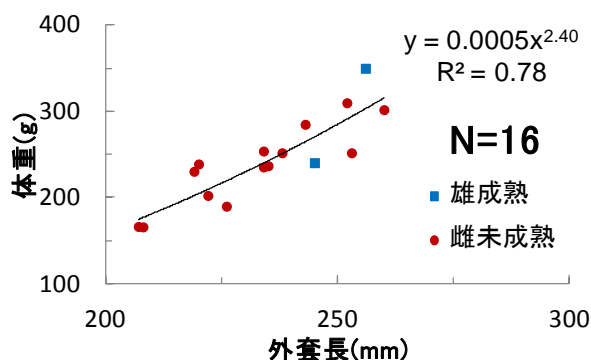


図 2-6 供試スルメイカの外套長と体重との関係

2-1-3 実験装置

2-1-3-1 LED 光刺激装置・ND フィルター

LED 光刺激装置には、ERG 測定用の LED 光源(クルーシャル・クーリング・パフォーマンス株式会社, 図 2-7), LED 光源の発光制御電源 (PMC18 1-A, 菊水電子工業株式会社, 図 2-8), 刺激光制御と網膜電位記録用の AD 変換機 (USB1/0 Terminal AI0-120802 LM-USB Multifunction DAQ Unit, 株式会社コンテック, 図 2-9)を使用した。



図 2-7 ERG 測定用 LED 光源



図 2-8 LED 光源の発光制御用電源



図 2-9 刺激光制御と網膜電位記録用の AD 変換機

本実験では光源装置(図 2-7)に組み込まれている 22 種の LED を使用した。LED 刺激光は、グラスファイバー(MSG4-1100S-RM, MORITEX)と集光レンズ(MLS-60P, MORITEX)を利用して直径 5mm のビームにして照射した。LED 刺激光の光量子束密度(Photon Flux Density, PFD)を図 2-10 の要領で、ファイバーマルチチャンネル分光器(Ocean Optics 社製, USB4000)を使用して測定し、各 LED 刺激光の PFD 積分値(積分範囲 360~860nm)が等しくなるように発光制御機の電流値を調節した。なお、PFD 測定距離の 180mm は ERG 測定における集光レンズ表面からスルメイカ眼球表面までの距離である。LED 光の光量調節には、光量を約 1/2, 1/4, 1/8 に減ずる Neutral Density (ND) フィルター(PRO ND2, PRO ND4, PRO ND8, ケンコー, 図 2-11)を使用した。LED 光の PFD 測定の際、集光レンズと受光器の間にフィルターをおいて、各フィルターの分光透過率を求めた。

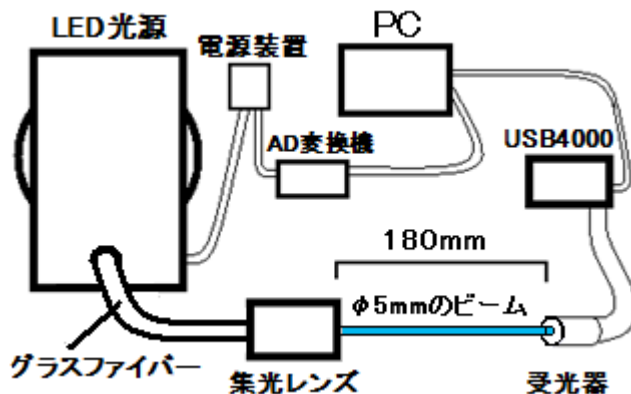


図 2-10 光量子束密度測定図

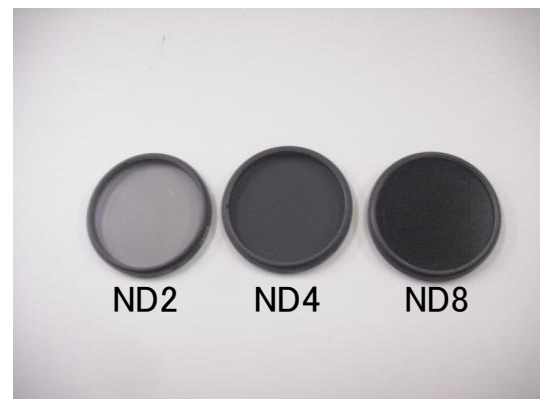


図 2-11 ND (Neutral Density) フィルター

図 2-12 に各 LED 刺激光別の分光分布, 表 2-1 に各 LED 刺激光のピーク波長, 半値幅(半値全幅), 380nm のピーク PFD を 1 とした相対値, 表 2-2 に LED 光源の設定電流値を示した。

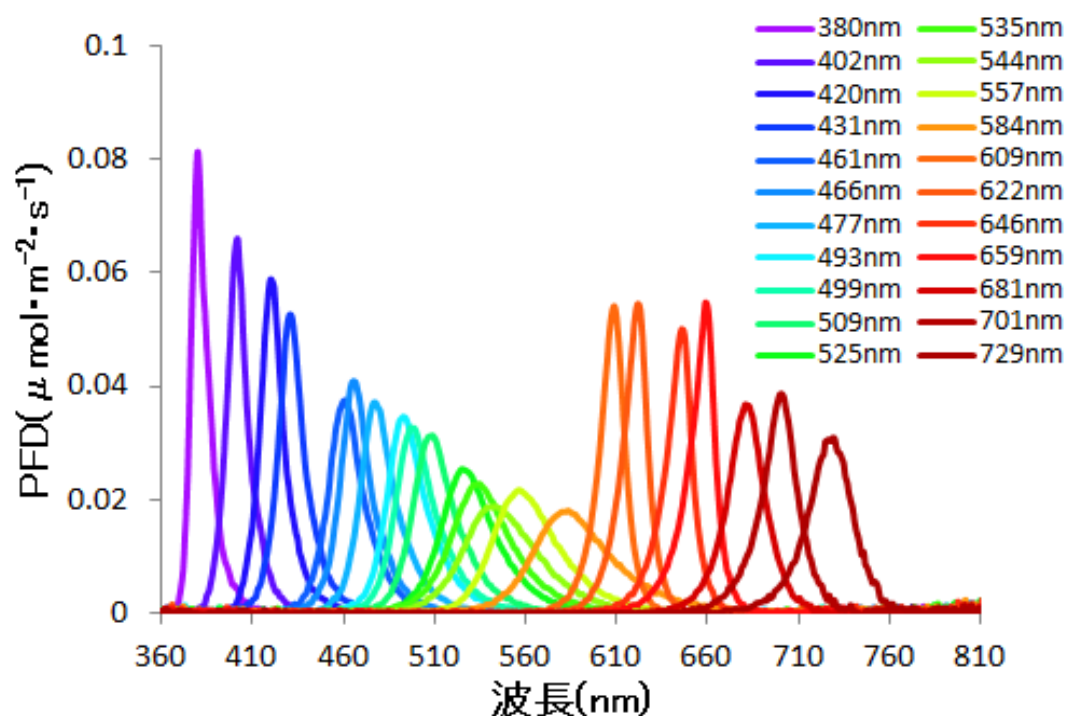


図 2-12 LED 刺激光別の分光分布

表 2-1 LED 刺激光の特性

ピーク波長(nm)	半値幅(nm)	ピークPFD相対値
380	10	1.00
402	13	0.81
420	15	0.72
431	16	0.65
461	21	0.46
466	18	0.50
477	22	0.46
493	24	0.42
499	25	0.40
509	26	0.38
525	33	0.31
535	37	0.28
544	47	0.23
557	40	0.27
584	47	0.22
609	15	0.67
622	15	0.67
646	15	0.61
659	15	0.67
681	23	0.45
701	21	0.47
729	28	0.38

表 2-2 LED 光源の設定電流値

ピーク波長(nm)	PFD1 (A)	PFD2 (A)	PFD3 (A)	電流値最大(0.36A) (μmol·m⁻²·s⁻¹)
380	0.303	0.352		2.150
402	0.281	0.307	0.336	
420	0.270	0.287	0.305	
431	0.267	0.282	0.300	
461	0.265	0.278	0.293	
466	0.266	0.281	0.295	
477	0.267	0.284	0.301	
493	0.266	0.282	0.300	
499	0.269	0.289	0.312	
509	0.267	0.285	0.305	
525	0.270	0.292	0.318	
535	0.272	0.298	0.328	
544	0.285	0.337		2.400
557	0.279	0.314	0.354	
584	0.310			1.490
609	0.272	0.293	0.316	
622	0.272	0.291	0.310	
646	0.267	0.282	0.296	
659	0.266	0.279	0.292	
681	0.294	0.336		2.580
701	0.321			1.560
729	0.290	0.328		2.840

LED 刺激光の発光特性としては，ピーク波長が 380～509nm，609～729nm の範囲にある 17 種の LED 刺激光は，半値幅が 30nm 未満で，ピーク値が突出した分光分布をしているが，ピーク波長 525～584nm の範囲にある 5 種の LED 刺激光は，半値幅が 33nm～47nm で，ピーク PFD 相対値(表 2-1)が 0.22～0.31 と低く，発光帯域が広い分光分布を示した。表 2-2 では各 LED 刺激光の PFD 積分値が $1\sim3\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ になるように設定する電流値を示したが，LED によっては電流値を最大(0.36A)に設定しても PFD 積分値が 2 または $3\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ に達しないものもあり，それらについては電流値を最大にした時の PFD 積分値を示した。

実験に使用した ND フィルターの分光透過率を図 2-13 に示した。どの ND フィルターも分光透過率の差は小さく，ND2 では約 60%，ND4 では約 28%，ND8 では約 16%であった。

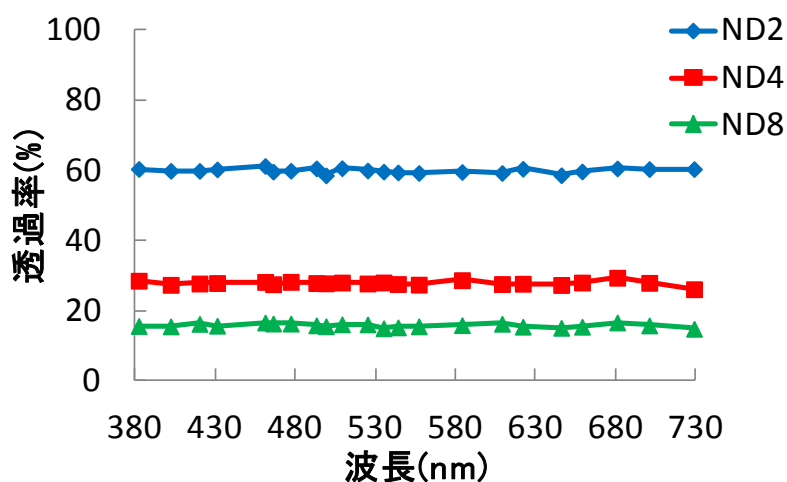


図 2-13 ND フィルターの分光透過率

2-1-3-2 網膜電位記録装置

網膜電位は，高感度増幅機(アンプ，Bioelectric Amplifier MEG1200，日本光電，図 2-14)によって電位変化を増幅し，AD 変換機(図 2-9)でデジタル信号に変換して，データロガーソフトウェア C-LOGGER(コンテック)を使って PC に記録した。アンプの設定は Gain $20\mu\text{V}\sim 1\text{mV}$ ，Locut5Hz，Hicut1000Hz とし，C-LOGGER のデータサンプリング周波数は 1kHz とした。



図 2-14 電位変化増幅用アンプ

2-1-4 実験方法

供試スルメイカは、暗室構造の小型水槽(内径 1.5m, 水深 0.63m, 水温 13～16℃, 図 2-15)内で 1 時間以上暗環境に馴致させた。マグネシウムイオンによってスルメイカを沈静化する方法⁸⁾に基づき、海水にニガリを加えた麻醉液(Mg^{2+} 濃度 $0.05\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$)に 10～20 分間浸漬し、不動化した。 Mg^{2+} のモル濃度計算については「巻末資料 1」に示した。不動化した後、供試個体の腹側外套膜を切開し測定台(図 2-5)上において、鰓心臓に海水を強制灌流して呼吸を確保し、海水で湿潤状態にしたキムタオルで体表を覆って乾燥を防いだ(図 2-16)。この状態の供試個体の左眼を上方に向け、眼球周辺の角膜を切除した。電極には銀線を使用し、スルメイカの眼球表面に測定電極、眼球付近の体表に基準電極を当て(図 2-17)刺激光を照射し、図 2-18 のような応答波形を記録した。Bilotta⁹⁾は zebrafish の ERG 測定において、眼球表面に測定電極と尾付近の体表に基準電極を設置して ERG 波形を記録し、またこの波形は測定電極を硝子体に挿入して測定した際の波形と違いが無かったことから、電極の位置によって ERG 波形は変わらないとしている。このことから、本実験で得られた刺激光に対するオン・オフ反応は網膜電位図であるとみなした。刺激光の照射は 1 秒間で、これを 10 秒間隔で 2 回おこなった。記録画面で応答波形が確認できた場合は、ND フィルターによって刺激光を減光し、再度刺激光を照射した。応答波形が確認できなくなった段階で測定を終了し、1 分間暗環境に馴致させた後、LED 刺激光の波長を切り替えて測定を繰り返した。この ERG の測定過程を図 2-19 に示した。



図 2-15 暗室構造の小型水槽



図 2-16 測定台上にセットしたスルメイカ



図 2-17 眼球と体表に接触させた電極

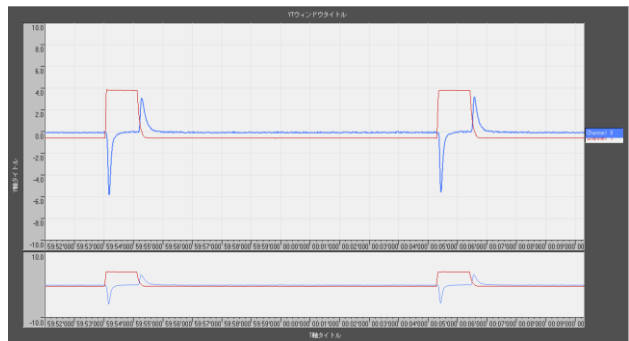


図 2-18 スルメイカの応答波形の PC 記録例

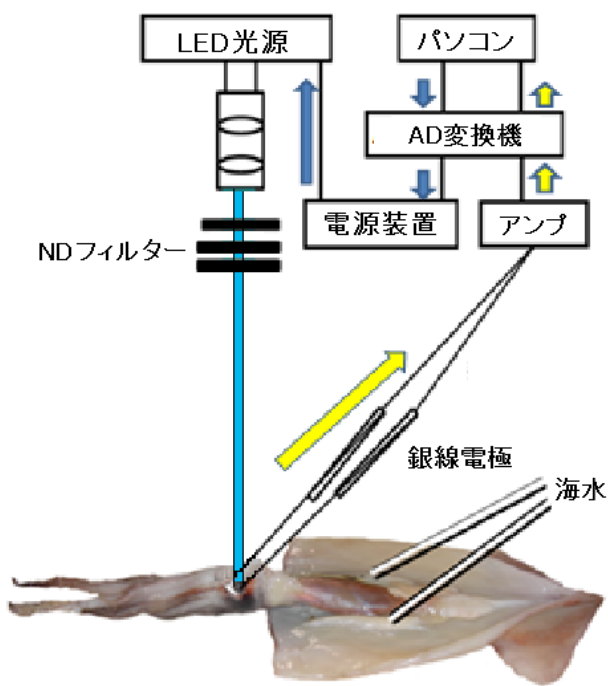
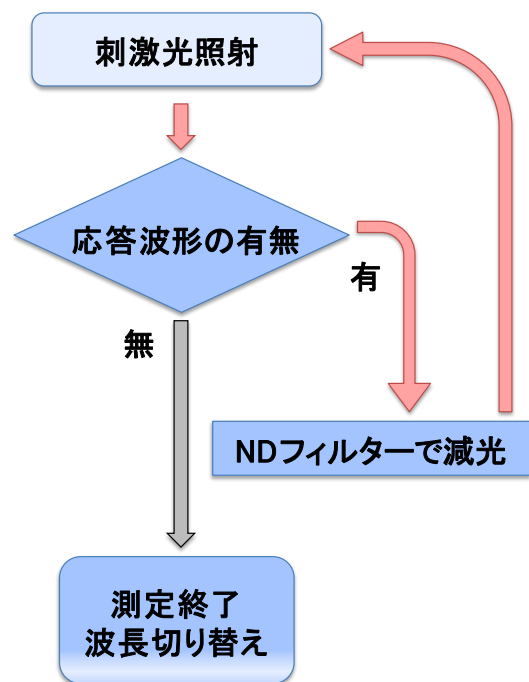


図 2-19 ERG の測定過程



2-1-5 解析方法

ERG の測定データはノイズ軽減のために、移動平均処理(移動量 11)と加算平均処理を施した。具体的な処理例を「巻末資料 2」に示した。2-1-5-1 に光覚閾値と分光視感度、2-1-5-2 に応答振幅を求める方法について示した。

2-1-5-1 光覚閾値と分光視感度

スルメイカの光覚閾値は応答波形が確認できた刺激光の最小の PFD 積分値とし、LED 刺激光の PFD 積分値に ND フィルターの分光透過率を使用枚数分乗することで求めた。図 2-20 はピーク波長 557nm の刺激光を 3 段階の光量で照射した時のスルメイカの応答波形を示し、図中の ON は刺激光照射開始、OFF は終了を意味している。ここでは ND8 を 3 枚、ND2 を 1 枚使用した条件では刺激光に対する電位変化がみられないため、ND8 を 3 枚使用した条件の PFD 積分値を 557nm の刺激光に対する閾値とした。また、閾値の逆数を感度として、最大感度を 1 とする相対値で分光視感度を表し、9 個体分の平均値を取ったものを図示した。

また、Govardovskii et al.¹⁰⁾は、電気生理学的手法から得られた光受容体の分光感度と視物質の吸光度がよく一致するとしている。そこで、視物質の吸光度を表す次の Govardovskii et al.¹⁰⁾のテンプレートをを用いた。

$$S(\lambda) = \frac{1}{\{\exp \cdot a \left(A - \frac{\lambda_{max}}{\lambda} \right) + \exp \cdot b \left(B - \frac{\lambda_{max}}{\lambda} \right) + \exp \cdot c \left(C - \frac{\lambda_{max}}{\lambda} \right) + D\}} \cdots (1)$$

ここで(1)式の λ は波長、 λ_{max} はピーク波長、ロドプシンなどビタミン A1 由来の視物質の吸光度を表す場合、 $a \sim c$ 、 $A \sim D$ はそれぞれ、 $a=69.7$ 、 $b=28$ 、 $c=-14.9$ 、 $A=0.8795+0.0459\exp[-(\lambda_{max}-300)^2/11940]$ 、 $B=0.922$ 、 $C=1.104$ 、 $D=0.674$ である。¹⁰⁾このテンプレートを元に、分光視感度の各プロットとの最小二乗法から(1)式における定数を求め、分光視感度の近似曲線を図示した。

2-1-5-2 応答振幅

応答振幅は、ピーク波長が 420・461・493・525・557・646nm の 6 種類の LED 刺激光について測定した。スルメイカの応答波形のうち、刺激光照射開始時にみられる応答波形の振幅(図 2-20)と刺激光の PFD 積分値との関係をグラフ化した。応答振幅の測定個体数は 6 尾で、振幅には個体差があったため、グラフには各光量段階における振幅の最大値を使用した。また、Normann and Werblin¹¹⁾はイモリの ERG 測定の結果から、刺激光の光量と応答振幅との関係は次の式で表せるとしている。

$$V_r = V_{rmax} \frac{I^n}{I^n + k^n} \cdots (2)$$

ここで、 V_r は応答振幅、 V_{rmax} は最大応答振幅、 I は光量、 k は V_r が $V_{rmax}/2$ となる光量で、 n は曲線の勾配を示す定数である。実測値との最小二乗法によって波長ごとに k と n の値を求め、近似曲線を図示した。

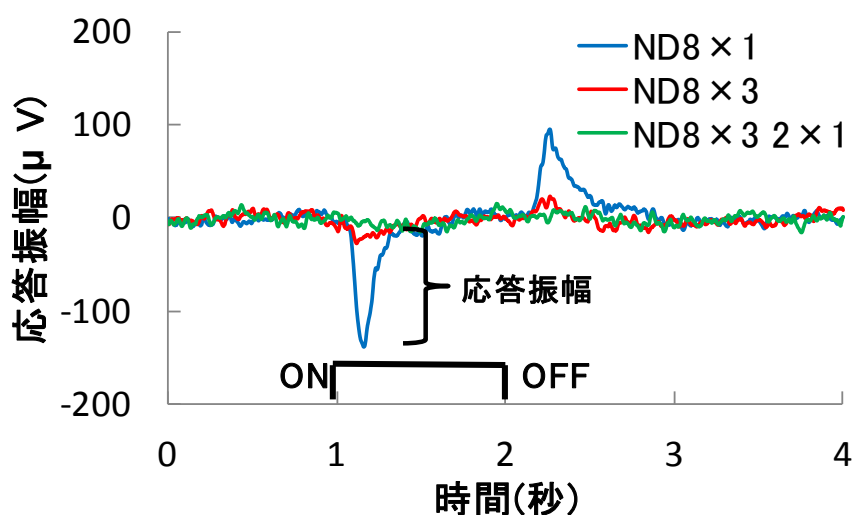


図 2-20 557nm ピークの刺激光に対するスルメイカの応答波形

2-2 結果

2-2-1 光覚閾値と分光視感度

図 2-21 に ERG によって求めたスルメイカの光覚閾値を示した。凡例の数字は個体番号である。ピーク波長 380~701nm の 21 種の LED 刺激光に対してスルメイカは ERG の応答波形を示し, 最小閾値は個体 2 で測得された 493nm における $2.83 \times 10^{-6} \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ であった。波長別の最小閾値には個体差があるが, どの個体においても 493nm から短波長, 長波長側になるにつれて光覚閾値が大きくなる傾向を示した。

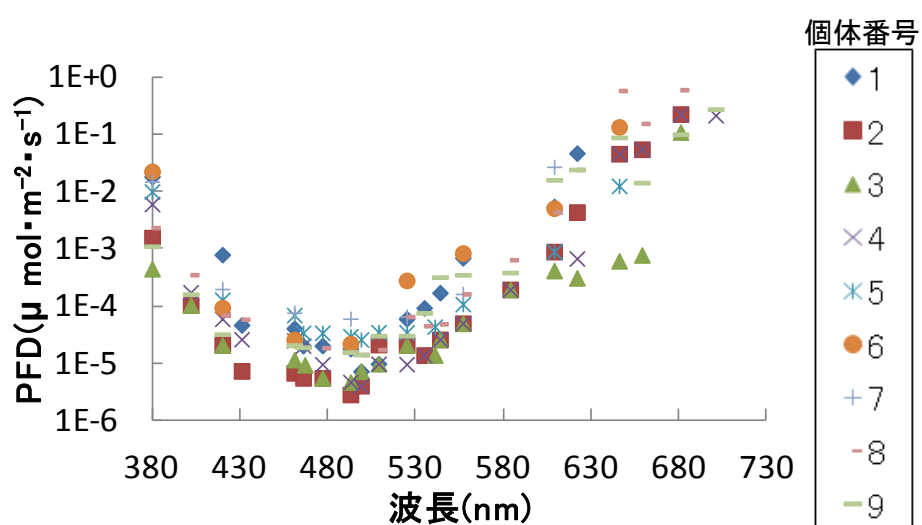


図 2-21 スルメイカの光覚閾値

図 2-21 の最小閾値から求めたスルメイカの分光視感度と, Govardovskii の (1) 式¹⁰⁾より求めた分光視感度の近似曲線を図 2-22 に示した。図 2-23 では縦軸を対数表記したものを示した。プロットは光覚閾値の実測値から求めた分光視感度, 実線は近似曲線を表している。図 2-24 では分光視感度の近似曲線の逆数を取り, 最小閾値を示した個体 2 の光覚閾値から求めたスルメイカの光覚閾値の近似曲線を示した。

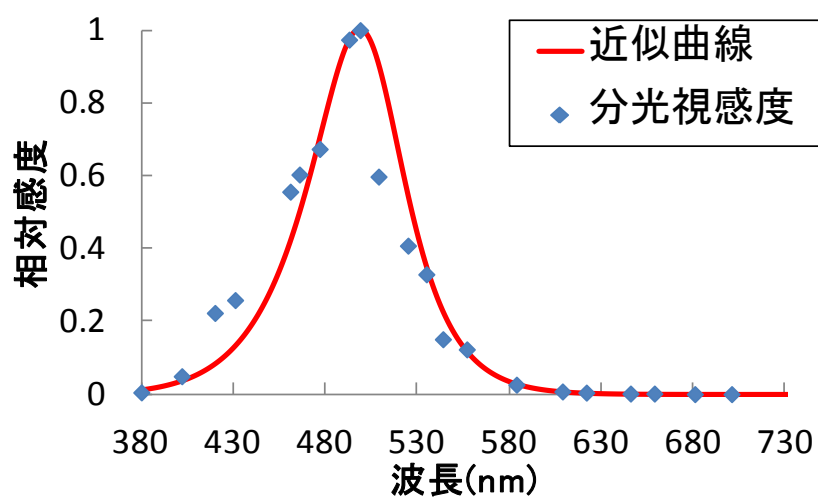


図 2-22 スルメイカの分光視感度

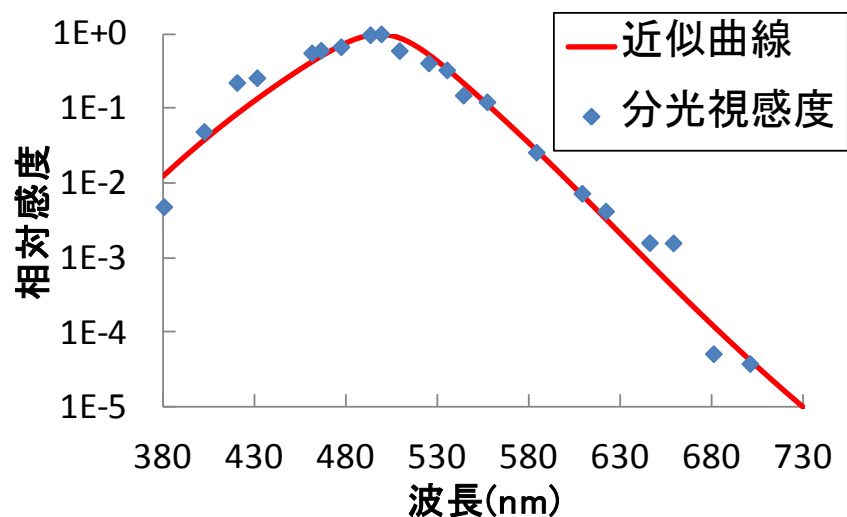


図 2-23 スルメイカの分光視感度(縦軸対数)

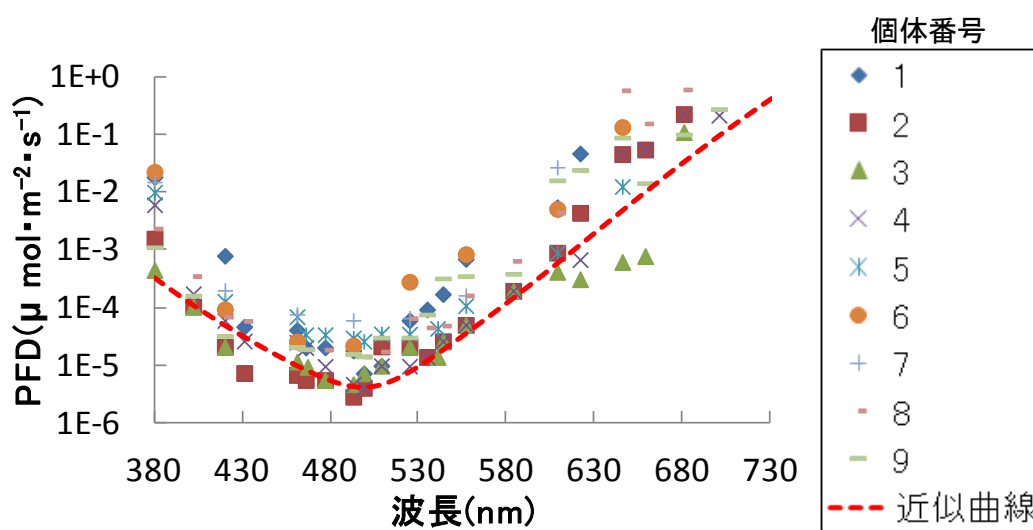


図 2-24 スルメイカの光覚閾値と近似曲線

図 2-22 に示したように、スルメイカの分光視感度は 499nm に単峰性のピークを示した。図 2-21 において、最小閾値であった 493nm では、499nm よりも個体による感度の差が大きかったため、9 個体分の視感度を平均化した際に、比較的高い感度を示したが、視感度のピークではなくなった。最小二乗法で求めた (1) 式の定数は、 $a=52$ 、 $b=28$ 、 $c=-15.2$ 、 $A=0.8795+0.0459\exp[-(\lambda_{\max}-300)^2/11940]$ 、 $B=0.922$ 、 $C=1.104$ 、 $D=-0.02$ となり、縦軸を対数表記にした図 2-23 において、相対的に感度の低い長波長側でも近似曲線は分光視感度とよく一致した。図 2-24 に示したように、分光視感度の近似曲線から求めた光覚閾値の近似曲線は、各波長における最小閾値付近と一致する傾向を示した。

2-2-2 応答振幅

図 2-25～2-30 に、スルメイカの各波長に対する応答振幅と PFD 積分値との関係、および最大応答振幅 V_{rmax} 、 V_r が $V_{rmax}/2$ となる光量 k 、曲線の勾配を示す定数 n の値について示した。グラフにおけるプロットは実測値、曲線は Normann and Werbin¹¹⁾ の (2) 式から求めた近似曲線である。また、図 2-31 では波長別に比較するため、図 2-25～2-30 の近似曲線を示した。図 2-32 では図 2-25～2-30 の各曲線の最大振幅を 1 とする相対値を縦軸にとり、応答振幅と PFD 積分値との関係を図示した。応答振幅は、どの波長においても PFD 積分値が大きくなるにつれて増加する傾向がみられた。また同光量でも、図 2-22 に示した分光視感度において感度の高い波長ほど大きくなる傾向を示した。最大振幅 V_{rmax} は 461nm で最大の $8,639 \mu V$ を示し、461nm から短波長、長波長側に向かうにつれて V_{rmax} は減少し、420nm では $7,301 \mu V$ 、646nm では $307 \mu V$ であった。

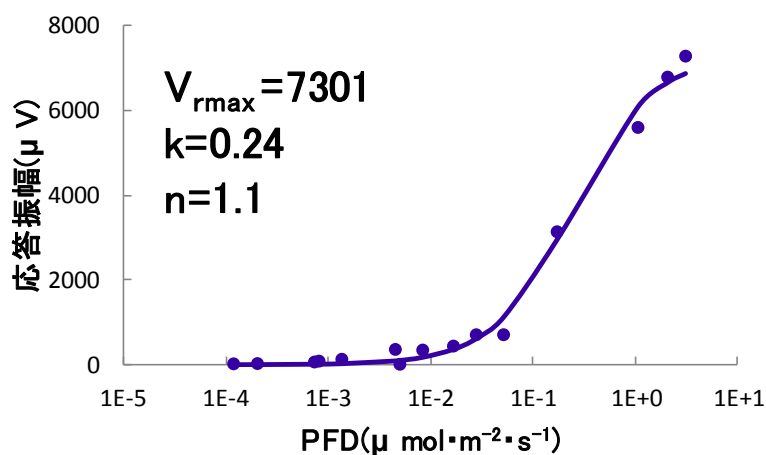


図 2-25 420nm の刺激光に対するスルメイカの応答振幅と PFD 積分値との関係

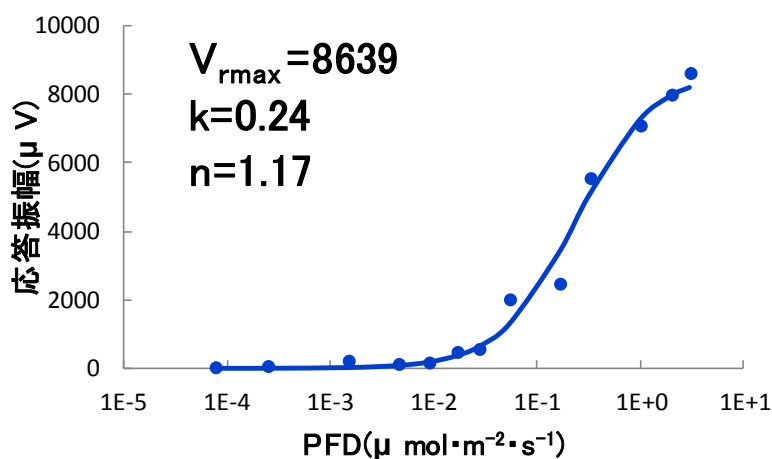


図 2-26 461nm の刺激光に対するスルメイカの応答振幅と PFD 積分値との関係

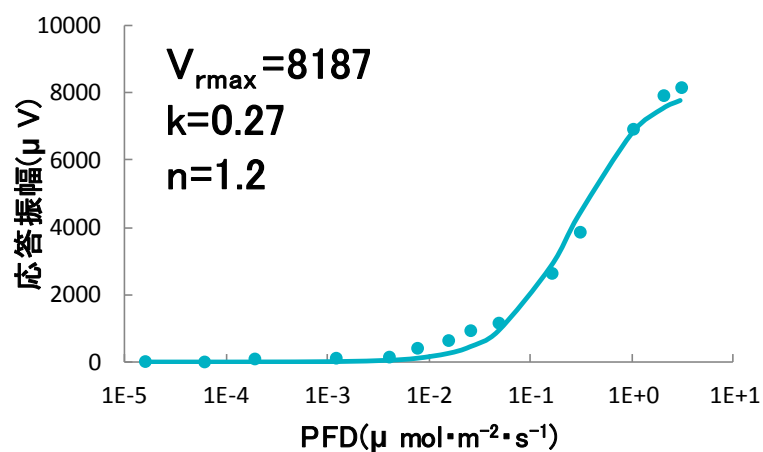


図 2-27 493nm の刺激光に対するスルメイカの応答振幅と PFD 積分値との関係

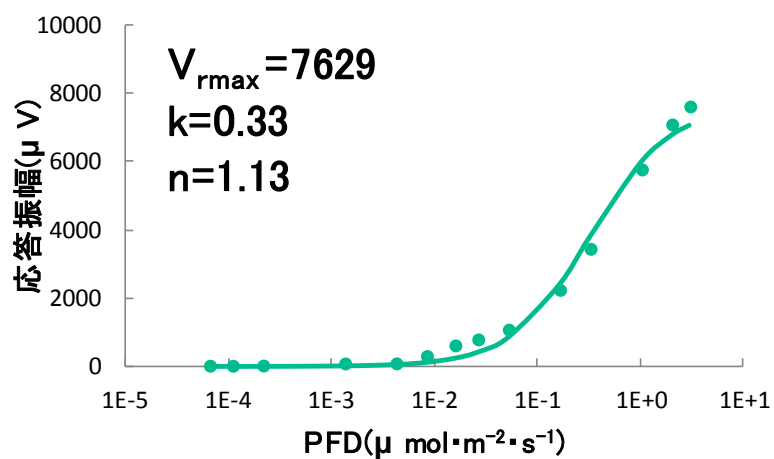


図 2-28 525nm の刺激光に対するスルメイカの応答振幅と PFD 積分値との関係

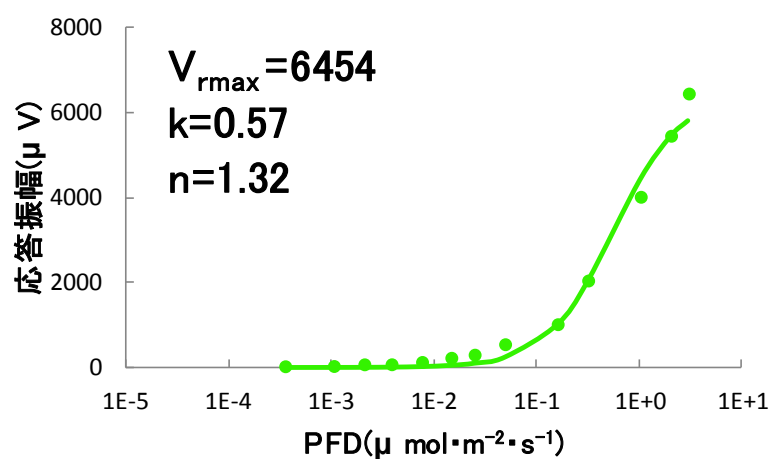


図 2-29 557nm の刺激光に対するスルメイカの応答振幅と PFD 積分値との関係

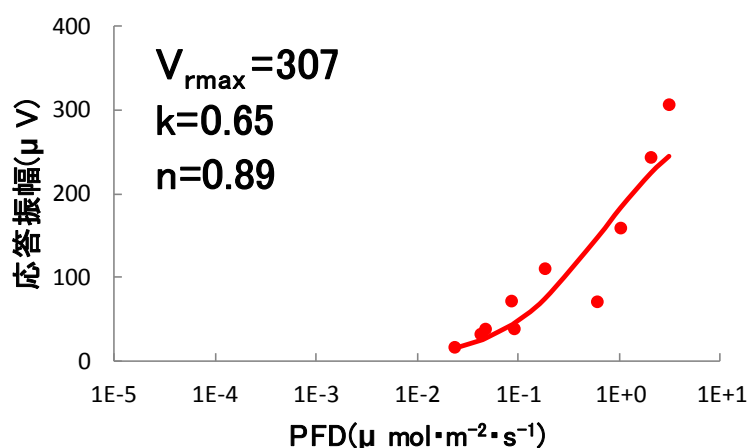


図 2-30 646nm の刺激光に対するスルメイカの応答振幅と PFD 積分値との関係

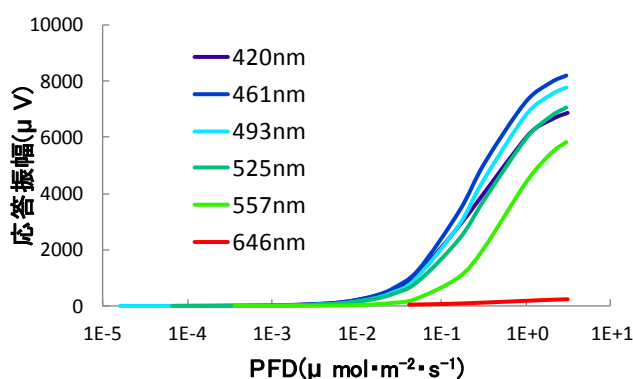


図 2-31

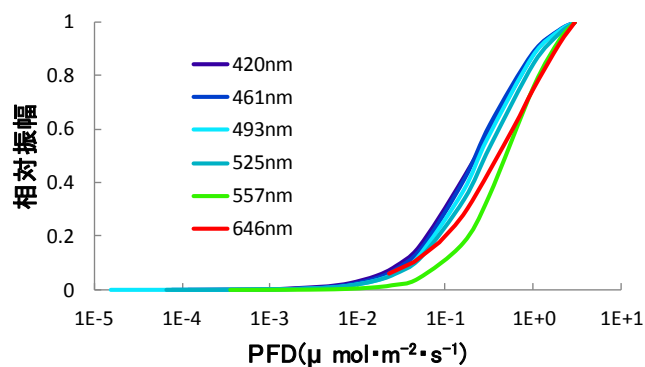


図 2-32

図 2-31 LED 刺激光に対するスルメイカの応答振幅と PFD 積分値との関係

図 2-32 LED 刺激光に対するスルメイカの応答振幅と PFD 積分値との関係(縦軸相対値)

図 2-32 によると、どの波長においても、PFD 積分値が $0.01 \sim 1 \mu \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の範囲で応答振幅は大きく変化した。振幅が最大振幅の半分になる時の光量 $k(11p, (2) \text{式})$ は、420nm, 461nm で最小の 0.24 を示した。図 2-32 において、 k は近似曲線の横方向の位置を定めており、 k の値が小さいほど、曲線は左側に位置した。曲線の勾配を示す定数 n は、557nm で最大の 1.32 を示し、420～525nm では 1.1～1.2, 646nm では 0.89 となった。420, 461, 493, 525nm の刺激光に対する振幅の実測値は PFD 積分値が $3 \mu \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の時、振幅の増加が少なく、反応が飽和に近い傾向を示したが、557, 646nm の刺激光においては反応が飽和する傾向はみられなかった。

2-3 考察

スルメイカは 380~701nm の 21 種の LED 刺激光に対して、ERG の応答波形を示した。また、応答波形は刺激光照射にともなう負の電位変化と、消灯にともなう正の電位変化を示した。奥埜¹²⁾は節足動物や軟体動物の感杆型を示す視細胞は例外なく興奮によって脱分極すると報告されており、スルメイカの応答波形もこの傾向を示すことがわかった。反応を示した波長のうち、最も短波長側の 380nm は最も長波長側の 701nm と比べ約 100 倍感度が高かった。スルメイカの視物質であるロドプシンとレチノクロームはどちらも 380nm より短波長側の紫外光に対して吸光度を示すことから、^{6, 7)}スルメイカは 380nm より短波長側の紫外光に対しても ERG の応答波形を示すものと考えられる。

本研究におけるスルメイカの最小の光覚閾値は、493nm の $2.83 \times 10^{-6} \mu \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ でこの時の放射照度値は $2.34 \times 10^{-4} \mu \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、ルクス照度値は $5.58 \times 10^{-4} \text{lx}$ であった。ルクス照度は、人の分光感度を考慮した明るさを表す心理的物理量である¹³⁾ため、他の生物に用いるには問題がある。しかし、かつては電気生理学的に調べた光感覚にはルクス照度が単位として用いられている。^{14, 15)}その結果と比較するために、今回のスルメイカの光感覚を参考までにルクス照度値でも示した。小林¹⁵⁾は魚類の桿体の閾値を $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{lx}$ としており、スルメイカの光覚閾値のルクス照度はこの範囲に収まった。魚類の閾値をみると、ERG 測定から戸枝¹⁶⁾はサンマの最小閾値を $2.8 \times 10^{-3} \mu \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 、遠藤¹⁷⁾はマアジの最小閾値を $10^{-5} \mu \text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ としており、これらと比べるとスルメイカの最小閾値は、サンマとマアジの間に位置するものであった。

原ら⁷⁾は、スルメイカはロドプシンとレチノクロームの 2 種類の視物質をもち、ロドプシンの吸光度ピークは 480nm、レチノクロームの吸光度ピークは 490nm としている。図 2-33 に(1)式から求めたロドプシンとレチノクロームの吸光度曲線と、ERG から求めた分光視感度とその近似曲線を示した。

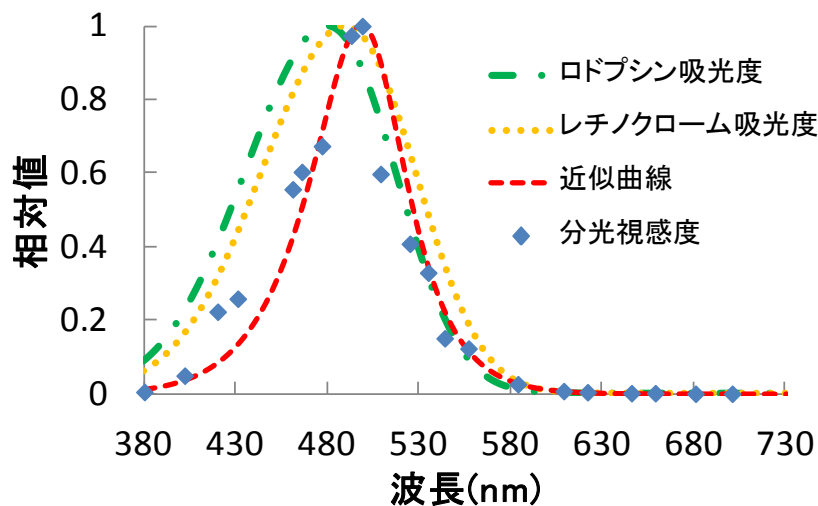


図 2-33 スルメイカの分光視感度と視物質の吸光度

今回，近似曲線を図示するのに用いた Govardovskii et al.¹⁰⁾による視物質の吸光度の式は，光受容体の分光感度と一致するとしている。しかし，本実験から得られた分光視感度については，視感度ピークから長波長側では，分光視感度は視物質の吸光度曲線と重なる傾向を示したが，視感度ピークから短波長側では，分光視感度は視物質の吸光度曲線と比べ相対値が低くなり，一致しなかった。Smith¹⁸⁾は，水晶体や硝子体など，視物質にいたるまでの眼球内の様々な媒質の分光透過率は短波長領域で低く，短波長側の感度を下げているとしている。また，Govardovskii et al.¹⁰⁾による視物質吸光度の式は，単離した網膜から求めたものであるため，眼球内媒質の透過率の影響を受けていない。このことから，スルメイカの眼球内媒質の透過率が影響して，本実験から得られた分光視感度と視物質の吸光度曲線は視感度ピークから短波長側において一致しなかったと考えられる。生物の光感覚をより正確に求めるには，視物質の吸光度や ERG だけでなく，眼球内の媒質の透過率についても調べる必要がある。

応答振幅と PFD 積分値との関係を示した図 2-25～2-32 において，近似曲線の勾配を表す n の値は 0.89～1.32 と波長による差が大きかった。長波長側の刺激光 557nm(図 2-29)，646nm(図 2-30)の応答振幅と PFD 積分値との関係をみると，PFD 積分値が $3 \mu \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の場合でも応答振幅が飽和せず，さらに増大する傾向を示した。そこで 557，646nm を除き，420，461，493，525nm について近似曲線をみると，4 つの曲線はほぼ重なり， k の値は 0.24～0.33， n の

値は 1.1~1.2 となった。魚類における n の値について、戸枝¹⁶⁾はサンマについて $n=0.68$ 、Naka and Rushton¹⁹⁾はコイ科のテンチについて $n=0.7$ 、Dowling²⁰⁾はガンギエイについては $n=1$ と報告している。スルメイカの最大振幅 V_{rmax} は、461, 493nm で $8000\mu V$ 以上になった。戸枝¹⁶⁾は、サンマの応答振幅の最大値は 580nm の刺激光照射時の $5020\mu V$ と報告しており、スルメイカの刺激光に対する反応はサンマよりもかなり大きいことがわかった。Eguchi and Horikoshi²¹⁾は、 n が大きいほど刺激強度の増大に対する反応の増分が大きくなるため、コントラスト視に優れるとしており、このことと刺激光に対する振幅の大きさからも、スルメイカは魚類よりも光量変化を感知しやすく、コントラスト視に優れているものと考えられる。

本実験から得られたスルメイカの分光視感度の半値幅は 62nm であった。Kobayashi²²⁾は魚類について、魚種ごとに生息域の深さと分光感度曲線を調べており、表層に生息する魚類ほど分光感度曲線のピークは長波長よりで、半値幅は広いとしている。スルメイカの分光視感度は深度 150~200m の底層にすむガンゾウビラメ、セミホウボウなど²²⁾と近い傾向を示した。また、応答振幅については、マハゼ、サヨリなど昼行性の魚種では曲線の勾配が急で、ウナギ、ホシザメ、ガンギエイなど夜行性の魚種では勾配が緩やかであるとしている。日本海沖合漁場では、スルメイカは日中深度 50~100m を遊泳しており、この深度まで透過した太陽光は減衰によって青、緑色の波長が卓越している。⁴⁾これらのことから、スルメイカの分光視感度は海中深くまで透過する波長に対して高い感度を示すという、生息環境に適したものであると考えられる。

ERG 測定には生体のスルメイカを用いているため、得られた結果はイカ釣り漁場のスルメイカの光感覚であるとみなし、漁灯光の波長、光量との関係を検討できるものと考えられる。次章では ERG 測定から求めたスルメイカの光感覚特性と、船下・船周の漁灯光測定の結果、昼間の天空光の海中測定の結果と照合し、海中でスルメイカがどの深度まで透過した光を感知できるのか、また感知できる漁灯光の分光分布はどのようなものを調べた。

第 3 章 漁灯光による船下・船周の光環境とスルメイカの光感覚

本章では、海中の天空光および漁灯光測定 of 既得値を用いて、海水の分光透過特性、船下・船周における漁灯光の分光分布、PFD 積分値を求め、これらから測器で漁灯光を測定できなかった深度における分光分布を計算から推定した。そして、漁灯光の海中分光分布と 2 章の結果における光覚閾値の近似曲線を照合して、スルメイカが漁灯光を感知できると考えられる深度を求め、これを漁灯条件ごとに比較した。

3-1 試料および方法

天空光の分光分布およびイカ釣り漁船の船下・船周における漁灯光の分光分布は、佐藤²³⁾による漁灯光の放射照度測定 of 既得値を PFD に変換することで求めた。測定データは、2009 年 5 月 12 日に石川県小木沖でおこなった天空光(13~14 時)と中型イカ釣り漁船 第 18 白嶺丸(183GT)の漁灯光について測定したものを使用した。船体周辺の光測定は、第 18 白嶺丸の左舷正横と測定船(16GT)の船首をロープで連結し、被測定船(第 18 白嶺丸)と測定船の距離を 20~160m の範囲で 20m 毎に設定し、測定船の船首から測器(自由落方式の連続水中分光放射照度計, Hyperpro II, Satlantic 社)を垂下しておこなった。擬餌針操作範囲の光測定は、左舷の 5 番釣機の長ナガシ前車から測器を垂下しておこなった。第 18 白嶺丸にはメタルハライド(MH)漁灯と LED 漁灯が搭載されており、出力や組み合わせによって異なる漁灯条件のうち、LED のみ点灯、MH のみ点灯、LED と MH の併用点灯の 3 条件について測定したデータを使用した。測定した光源条件、出力、測定開始時の第 18 白嶺丸正横から測定船船首までの距離を表 3-1 に示した。擬餌針の操作範囲の光測定については被測定船からの距離は 0m とした。LED は発光色が白(ピーク波長 450, 550nm) + 青緑(ピーク波長 505nm)であり、LED パネルは 0° (垂直)に設置し、水平方向に照射した。

表 3-1 第 18 白嶺丸の漁灯光測定条件

条件	光源	出力(kW)	第18白嶺丸舷側からの正横距離(m)
①	LED	40	0~160
②	MH	246	0~120
③	LED+MH	40+90	0~140

3-1-1 海水の分光透過特性

2009 年 5 月 12 日に石川県小木沖でおこなった天空光(13~14 時)の光測定データから, Lambert-Beer の法則²⁴⁾より, 次式を適用して海水の分光透過率 T を求めた。

$$T = \left(\frac{I}{I_x}\right)^{\frac{1}{x}} \cdots (3)$$

ここで, I は透過前の PFD ($\mu \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), I_x は海中を X_m 透過した後の PFD を表す。

3-1-2 船下・船周における漁灯光の分光分布とスルメイカの感知限界深度

2009 年 5 月 12 日に石川県小木沖でおこなった漁灯光測定データのうち, 382 ~ 729nm の PFD 積分値が, 各測点の舷側距離において 0.1, 0.05, 0.025 $\mu \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ となる深度を, 船体正横方向における各測定点について求めた。

次に, 測定限界以深の分光分布, PFD 積分値について, LED40kW 点灯時, 舷側距離 20m の測定データを例に説明する。測器の測定限界により, PFD 積分値が 0.025 $\mu \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 未満のデータは得られなかった。そこで, 0.025 $\mu \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 未満になる深度の PFD 積分値については, 0.025 $\mu \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上の範囲で, 図 3-1 に示した深度と PFD 積分値との関係における指数近似曲線から求め, この近似式において PFD 積分値が 0.01 $\mu \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ になる深度をプロットした。各深度における波長ごとの PFD は, (3) 式を変形した次式から求めた。

$$I_x = I \cdot T^x \cdots (4)$$

しかし, この計算から求めた PFD 積分値は, 同深度でも実測値の積分値と一致しない部分がある(図 3-2, 3-3)。これは, 3-1-1 で求めた透過率は天空光の下方向照射の測定データを用いたもので, 光が海中を 1m 直進した時の透過率を表しているが, 漁灯光の測定では, 漁灯点灯中の漁船から距離を隔てて測器を垂下しているため, 測定値には海水の透過率以外にも測器への入射角度等の要因が関わるものと考えられる。そこで, (4) 式から求めた PFD 積分値を, 図 3-1 における指数近似曲線と一致させるために, 同じ深度における計算値の PFD 積分値を近似曲線の PFD 積分値で除することで補正值を求め, これを(4)

式から求めた波長ごとの PFD に乗ずることで，図 3-4 の破線で示したように，ノイズしか測定できなかった深度における漁灯光の分光分布を求めた。

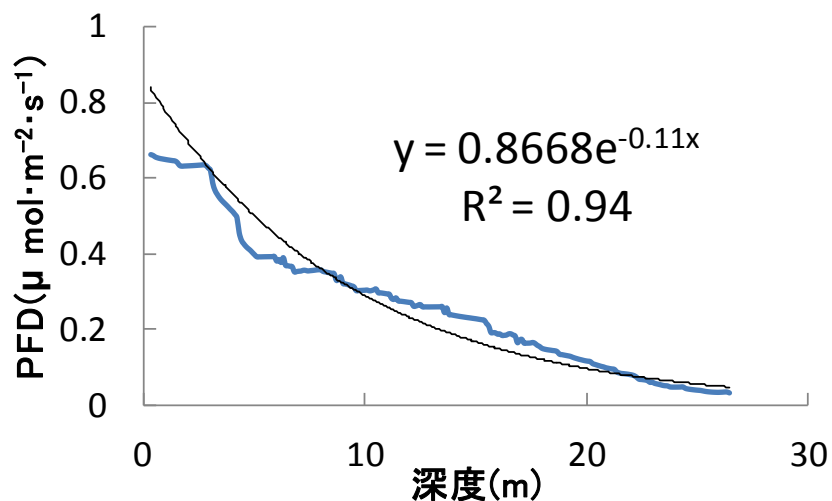


図 3-1 深度と PFD 積分値との指数近似曲線（LED40kW，舷側距離 20m）

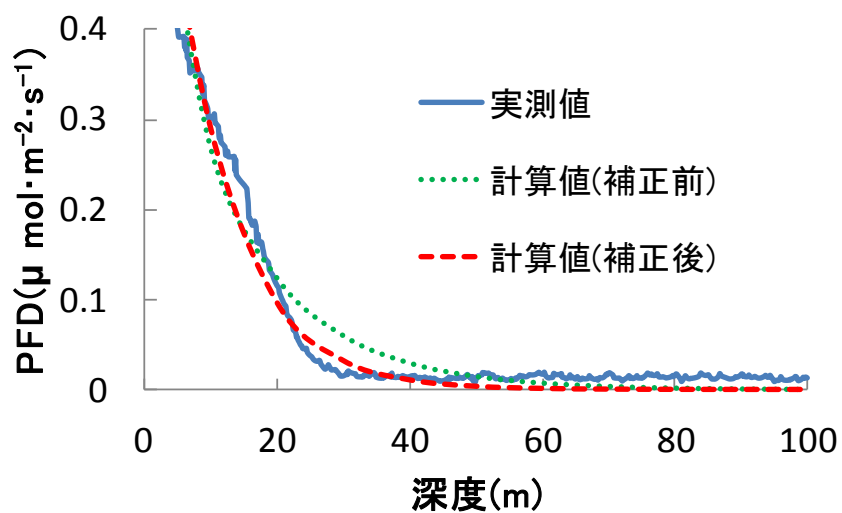


図 3-2 深度と PFD 積分値との関係（LED40kW，舷側距離 20m）

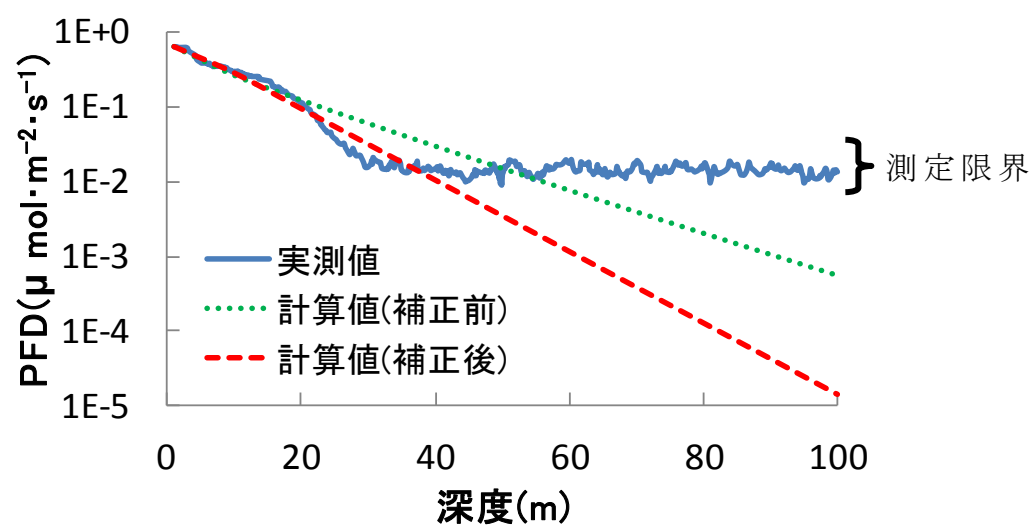


図 3-3 深度と PFD 積分値との関係 (LED40kW, 舷側距離 20m, 縦軸対数)

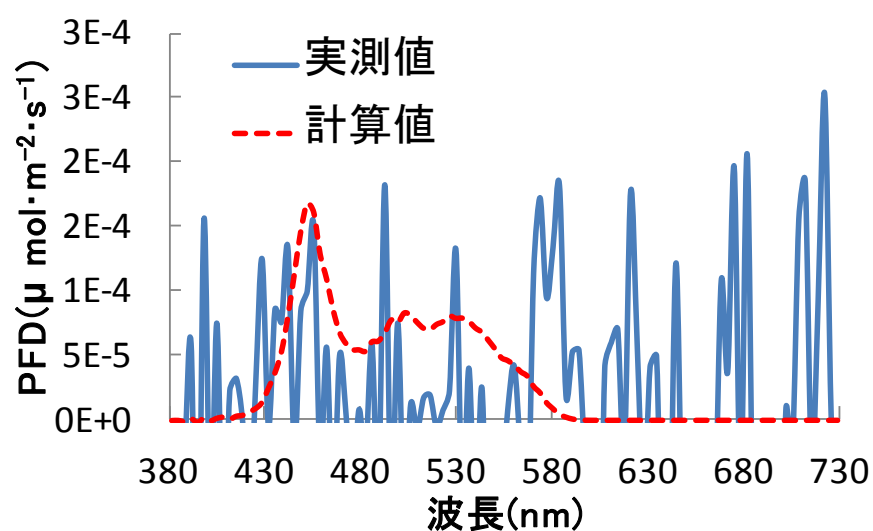


図 3-4 計算から求めた分光分布 (LED40kW, 舷側距離 20m, 深度 40m)

3-2 結果

3-2-1 海水の分光透過特性

図 3-5 に(3)式より求めた，透過距離別の海水の分光透過率を示した。X は透過距離(m)を表し，X=1 の場合，深度 0m と深度 1m の PFD から，X=2 の場合，深度 0m と深度 2m の PFD から求めた透過率であることを示している。

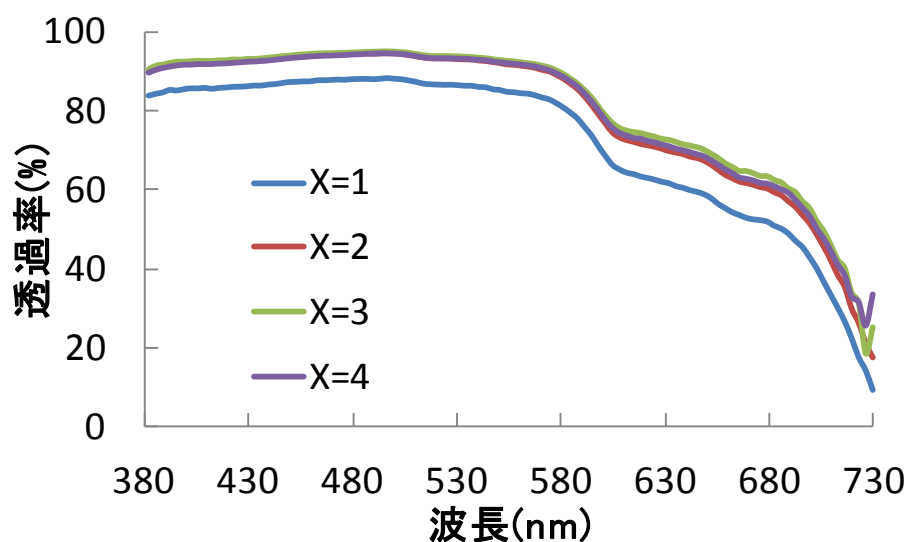


図 3-5 透過距離別 海水の分光透過率

図 3-5 において，どの透過率においても 382～581nm までは透過率が 80%以上あり，581nm から長波長側になるにつれて低くなった。X=1 以外の透過率はほぼ同じ傾向を示し，X=1 の透過率はそれらと比べ約 6%低い値となった。これは，透過距離 1m では海面の揺らぎなどの影響が大きく，測定値が大きく変動したためと考えられる。そこで，求めた分光透過率のうち，長波長側まで透過率を求めることができた X=1 と X=2 の透過率について，(4)式に当てはめ，計算値と実測値を比較した。図 3-6，3-7 に X=1，図 3-8，3-9 に X=2 の時の表層(10，20m)と深層(90，100m)における天空光の分光分布の計算値と実測値を，図 3-10 に深度と PFD 積分値の実測値，計算値との関係を示した。図中の実線は実測値，破線は計算値の分光分布である。

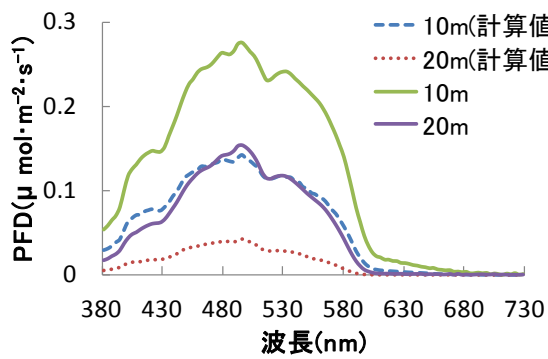


図 3-6 天空光の分光分布 (表層, $X=1$)

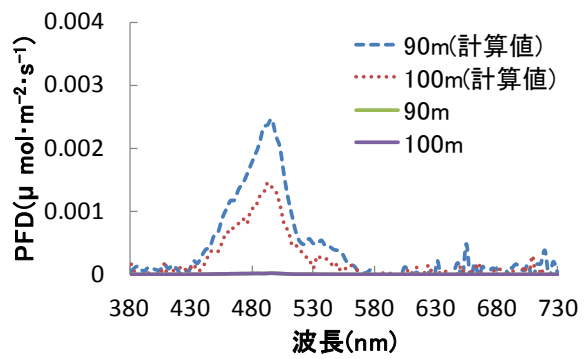


図 3-7 天空光の分光分布 (深層, $X=1$)

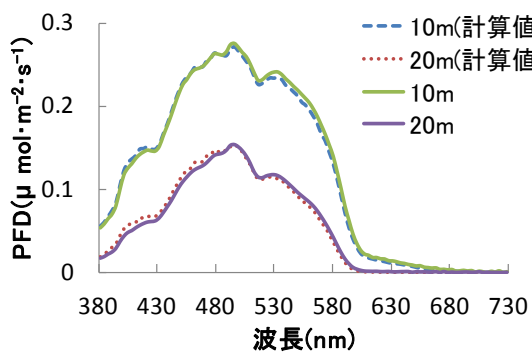


図 3-8 天空光の分光分布 (表層, $X=2$)

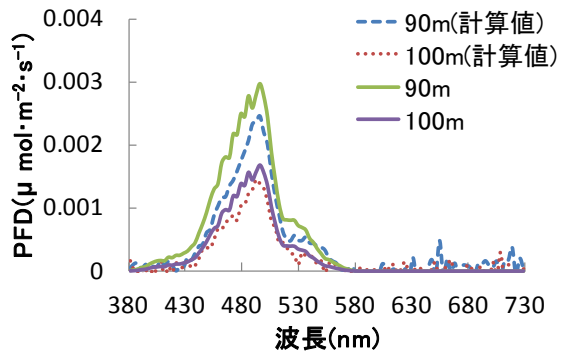


図 3-9 天空光の分光分布 (深層, $X=2$)

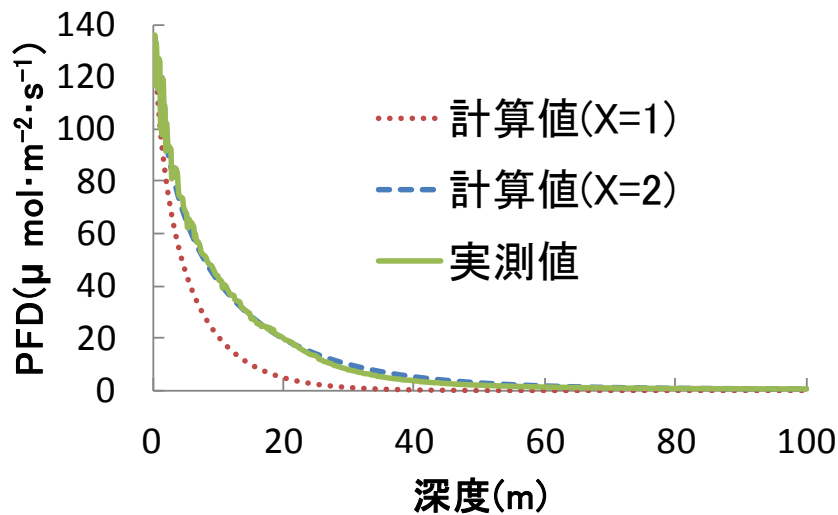


図 3-10 海中に透過した天空光の PFD 積分値と深度との関係

X=1 の透過率を用いると、どの深度においても波長ごとの PFD 計算値は実測値よりも低い値となったが、X=2 の透過率では、計算値と実測値はほぼ一致した。また、深度と PFD 積分値との関係においても、X=2 の透過率を用いると、計算値と実測値はほぼ一致した。以上のことから、X=2 の透過率が、2009 年 5 月 12 日の石川県小木沖における海水の透過率であるとし、図 3-11 に示した。透過率は 385~571nm の範囲で 90%以上あり、最大透過率は 496nm の 95%であった。571nm から長波長側になるにつれて透過率は低くなり、729nm では 18%であった。図 3-12 に示した、最も透過率が高かった 496nm における深度と透過率との関係から、この測定時には深度によって透過率に大きな差は無く、ほぼ 94%であった。図 3-13 に示したように、表層付近では PFD の変動が大きく、それに応じて図 3-12 における表層の透過率も一定でなかったと考えられる。

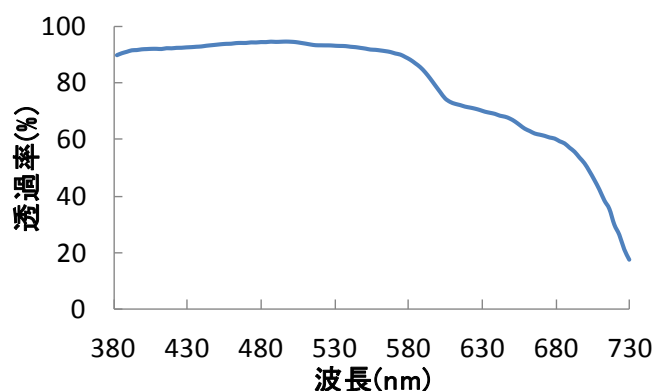


図 3-11 石川県小木沖における海水の透過率 (2009 年 5/12)

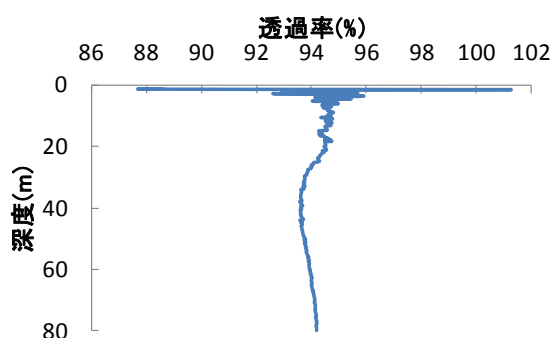


図 3-12

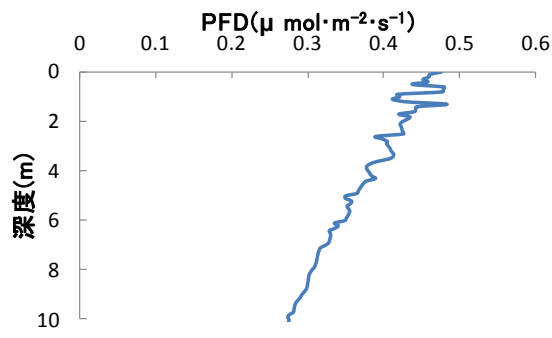


図 3-13

図 3-12 石川県小木沖における深度と透過率との関係 (496nm, 2009 年 5/12)

図 3-13 海中に透過した 496nm の PFD と深度との関係

3-2-2 船下・船周における漁灯光の分光分布とスルメイカの感知限界深度

図 3-14 に LED40kW 点灯時，図 3-15 に MH246kW 点灯時の船体正横方向における PFD 積分値の等値線とスルメイカの漁灯光に対する感知限界深度について示した。なお表 3-1 にも示したが，LED40kW の測定範囲は舷側距離 0～160m，MH246kW の測定は舷側距離 0～120m であった。

図 3-14 に示した LED40kW 点灯時におけるスルメイカの漁灯光に対する感知限界深度は，舷側距離 40m では深度 120m であった。舷側距離 40m において，PFD 積分値の等値線の間隔が大きい，すなわち深度による光の減衰が緩やかであることから，舷側距離 40m において，LED 漁灯光が海中に強く入射していることがわかった。

図 3-15 に示した MH246kW 点灯時におけるスルメイカの漁灯光に対する感知限界深度は，LED40kW と比べると，著しく突出して深い部分はなく，最も深い深度は舷側距離 20～40m における 90m であった。また，舷側距離 40m 以外では，感知限界深度は LED40kW よりも深い傾向を示した。PFD 積分値が $0.1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ となる等値線は LED40kW では舷側距離 60m であったが，MH246kW では舷側距離 100m まで伸びている。このことから，MH246kW 点灯時には広範囲にわたって漁灯光が海中に入射し，LED40kW に比べ遠方まで届いていることがわかる。

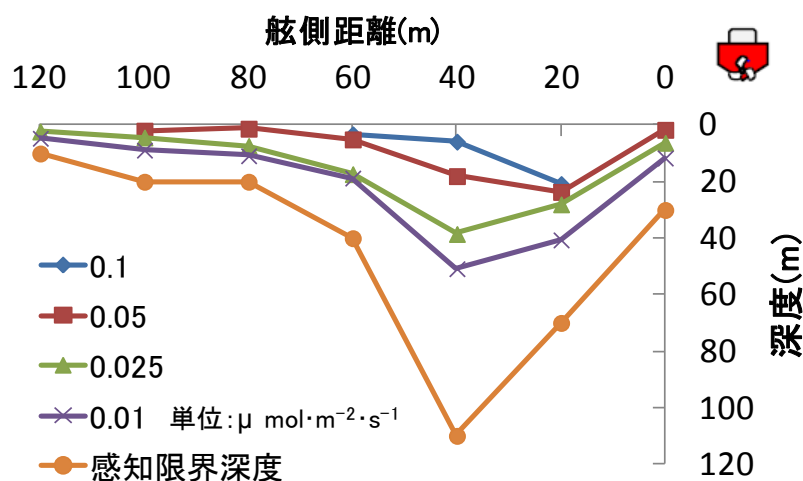


図 3-14 PFD 積分値等値線と感知限界深度 (LED40kW)

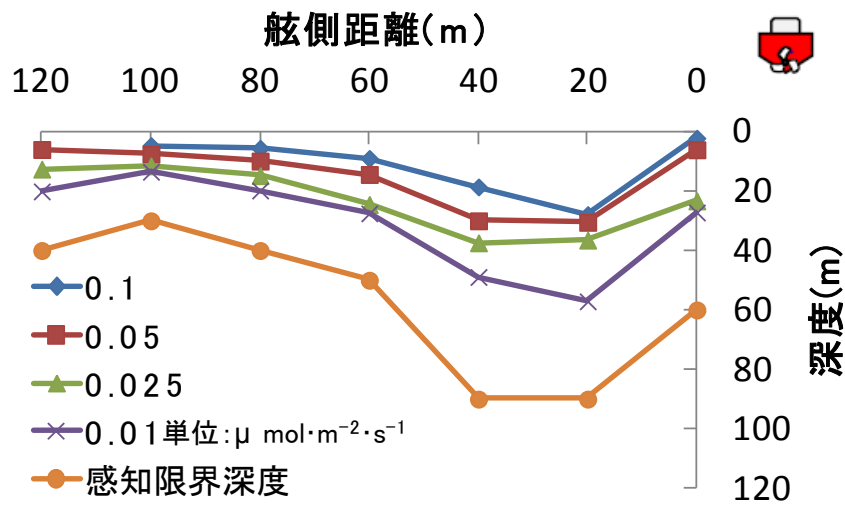


図 3-15 PFD 積分値等値線と感知限界深度 (MH246kW)

次に，図 3-16 に舷側距離 40m・深度 0m，図 3-17 に舷側距離 40m・深度 40m，図 3-18 に舷側距離 80m・深度 40m における漁灯光の分光分布について示し，深度，舷側距離の違いによる分光分布の変化を比較した。凡例の数値は漁灯光の PFD 積分値である。

図 3-16 に示した舷側距離 40m・深度 0m における分光分布では，どの波長においても MH246kW の PFD が LED40kW よりも大きく，MH246kW の PFD 積分値は $0.96 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で LED40kW の約 3 倍であった。また，LED40kW では 450nm，MH246kW では 590nm の PFD が突出する分光分布を示した。

図 3-17 に示した舷側距離 40m・深度 40m における分光分布では，LED と MH の双方で 590nm より長波長側における減衰が著しく，また，PFD 積分値は MH246kW で $0.021 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，LED40kW で $0.018 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ となり，深度 0m の時より差が小さくなった。このことから，舷側距離 40m において，MH 灯光は LED 灯光よりも海中で減衰しやすいことがわかる。

図 3-18 に示した舷側距離 80m・深度 40m における分光分布では，舷側距離 40m・深度 0m の時と同様に，MH246kW の PFD はどの波長においても LED40kW 上回り，PFD 積分値の差は 8.5 倍となった。また，MH246kW の分光分布は 506nm にピークをもつ形状を示した。図 3-16 において，MH246kW の 500nm 付近の PFD は相対的に低いことから，舷側距離 80m において，MH 灯光は LED 灯光よりも海中深

くまで透過しており、その波長は 500nm 付近が残存しやすいことがわかった。

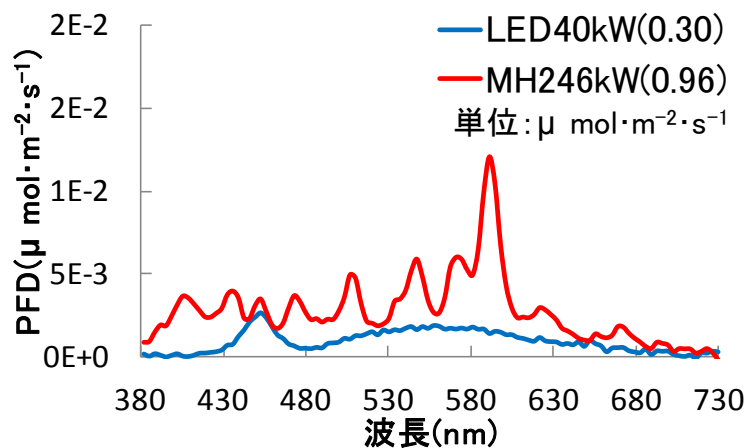


図 3-16 舷側距離 40m・深度 0m における LED40kW, MH246kW の分光分布

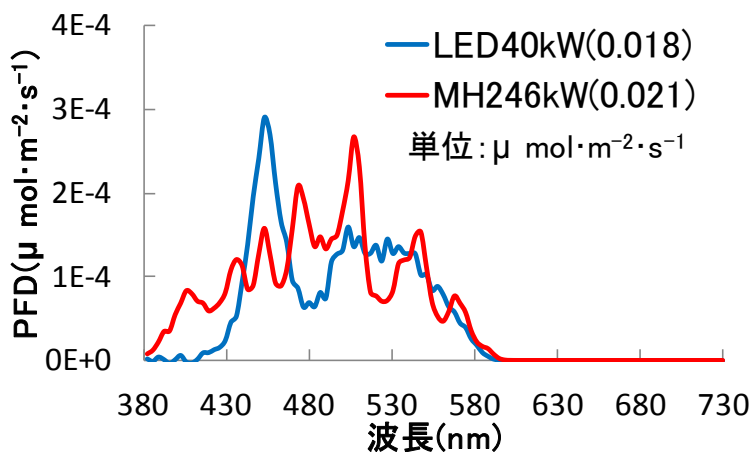


図 3-17 舷側距離 40m・深度 40m における LED40kW, MH246kW の分光分布

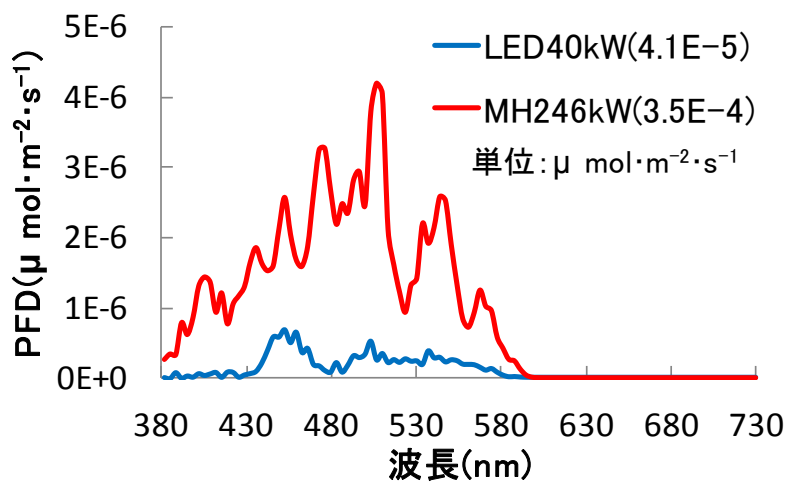


図 3-18 舷側距離 80m・深度 40m における LED40kW, MH246kW の分光分布

ここまではLED40kW点灯時とMH246kW点灯時のスルメイカの漁灯光に対する感知限界深度と、漁灯光の海中分光分布について比較した。次に、LEDとMHを併用点灯した条件(LED40kW+MH90kW)について、図3-18に船体正横方向におけるPFD積分値の等値線とスルメイカの漁灯光に対する感知限界深度について示した。

図3-19に示したLED40kW+MH90kW点灯時におけるスルメイカの漁灯光に対する感知限界深度は、舷側距離40mにおいて最も深く、深度120mであり、これはLED40kW点灯時と同様であった。また、舷側距離0mにおいて感知限界深度は70m、舷側距離60～120mでは深度30～50mとなり、これはMH246kW点灯時と似た傾向であった。PFD積分値の等値線は、どの積分値においても舷側距離120mまで伸びており、遠方まで漁灯光が届いていることがわかった。以上のことから、LED40kW+MH90kW点灯時の漁灯光感知範囲は、LED40kWとMH246kWの2つの特徴を併せもち、またLED40kW、あるいはMH246kWよりも広くなることがわかった。

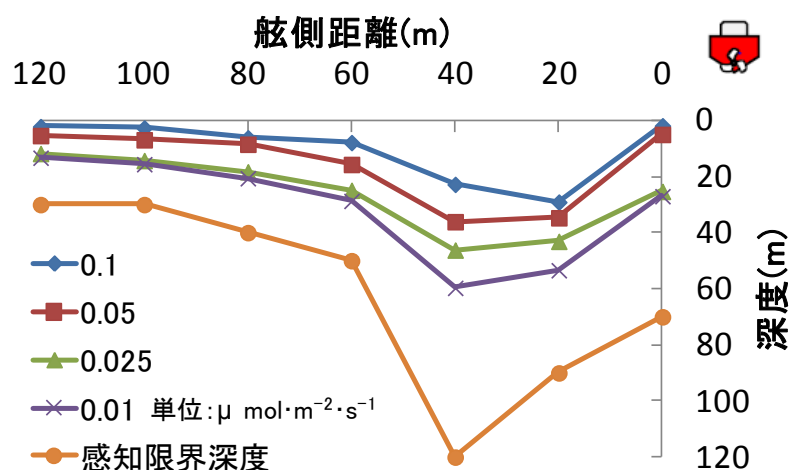


図3-19 PFD積分値等値線と感知限界深度(LED40kW+MH90kW)

図 3-20 に舷側距離 40m・深度 0m, 図 3-21 に舷側距離 40m・深度 40m, 図 3-22 に舷側距離 80m・深度 40m における LED40kW+MH90kW 点灯時の分光分布について, 図 3-16, 図 3-17, 図 3-18 に示した LED40kW 点灯時, MH246kW 点灯時の分光分布と重ねて示した。

図 3-20 に示した舷側距離 40m・深度 0m における分光分布では, LED40kW+MH90kW は MH246kW と同じ傾向を示した。PFD 積分値も $0.73 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ となり, MH246kW の $0.96 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ に近い値であった。また, 併用している LED40kW の分光分布は, MH90kW の分光分布に埋もれて見えなかった。

図 3-21 に示した舷側距離 40m・深度 40m における分光分布では, ほぼ全ての波長において LED40kW, MH246kW の PFD を上回っていた。PFD 積分値は $0.036 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ で MH246kW の 1.7 倍, LED40kW の 2 倍であった。

図 3-22 に示した舷側距離 80m・深度 40m における分光分布では, MH246kW に近い傾向を示し, 476, 509nm にピークを示した。このことから, 舷側距離 80m において, 海中深くに LED 灯光は届いておらず, ほぼ MH 灯光のみが入射していることがわかった。

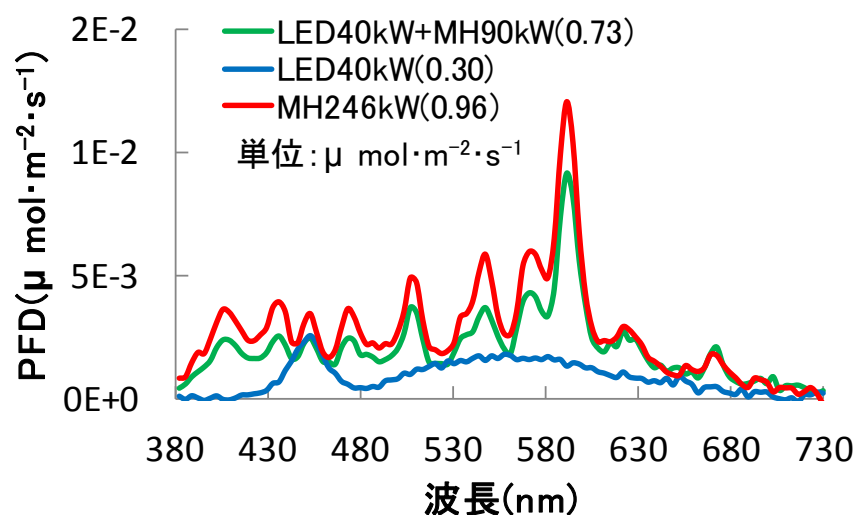


図 3-20 舷側距離 40m・深度 0m における LED40kW+MH90kW の分光分布

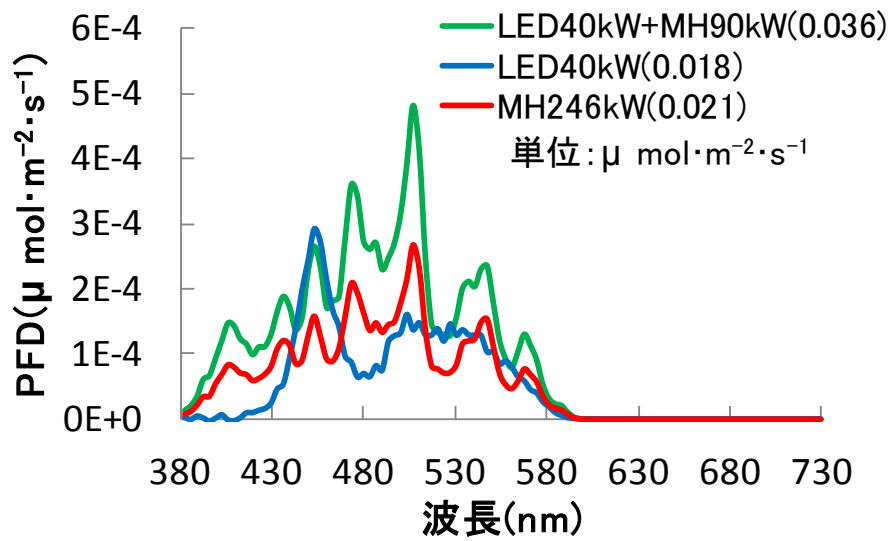


図 3-21 舷側距離 40m・深度 40m における LED40kW+MH90kW の分光分布

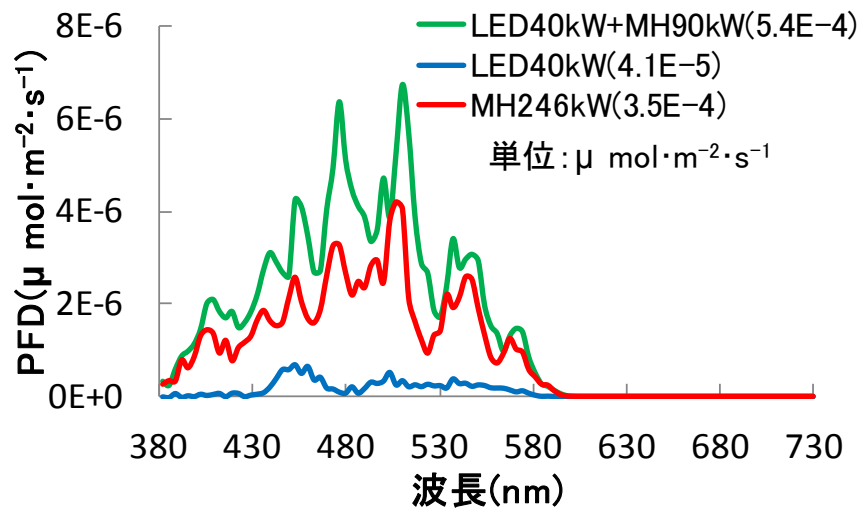


図 3-22 舷側距離 80m・深度 40m における LED40kW+MH90kW の分光分布

次に、各漁灯条件において、PFD 積分値を漁灯の総 kW 数で除することで、1kW あたりの PFD 積分値を求めた。図 3-23 に舷側距離別の深度 0m における 1kW あたりの PFD 積分値、図 3-24 に舷側距離 40m の深度別の 1kW あたりの PFD 積分値、図 3-25 に舷側距離 80m の深度別の 1kW あたりの PFD 積分値を、3 つの漁灯条件について示した。

図 3-23 に示した舷側距離別の深度 0m における 1kW あたりの PFD 積分値では、MH246kW がどの舷側距離においても最も低く、舷側距離 20、60m では LED40kW+MH90kW が LED40kW を上回り、舷側距離 80m 以遠では、両条件の 1kW あたりの PFD 積分値に差はみられなかった。

図 3-24 に示した舷側距離 40m の深度別の 1kW あたりの PFD 積分値では、深度 0m においては 3 条件とも PFD 積分値に差はみられなかったが、深度が深くなるにつれてその差は広がり、1kW あたりの PFD が最も大きいのは LED40kW であった。

図 3-25 に示した舷側距離 80m の深度別の 1kW あたりの PFD 積分値では、舷側距離 40m の時と異なり、LED40kW がどの深度においても最も PFD が低かった。MH246kW と LED40kW+MH90kW では、深度 30m までは両条件とも PFD 積分値はほぼ同じであったが、深度が 30m より深くなると差が広がり、LED40kW+MH90kW の 1kW あたりの PFD が最も大きかった。

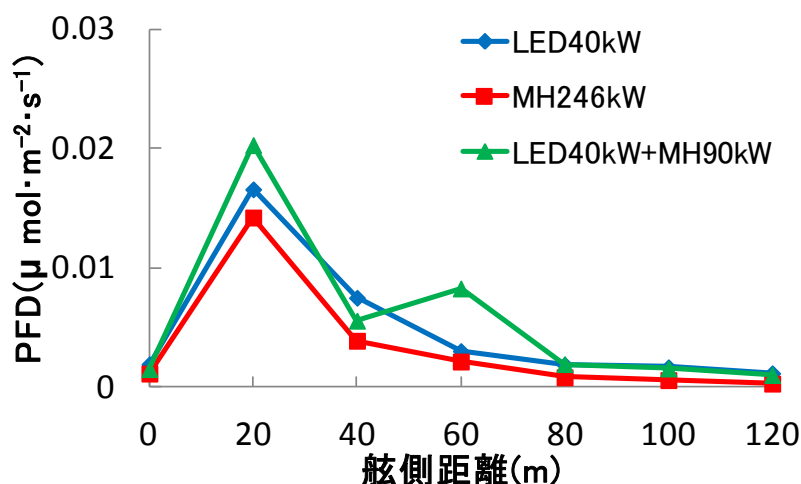


図 3-23 舷側距離別の深度 0m における 1kW あたりの PFD 積分値

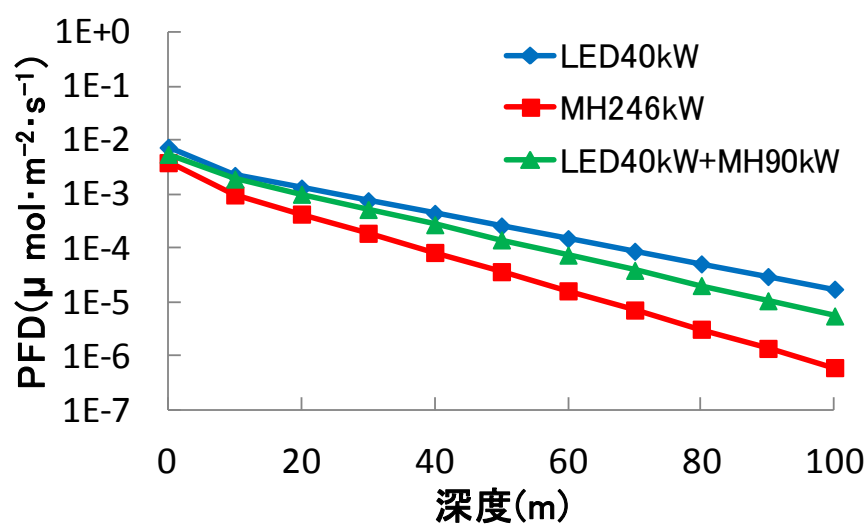


図 3-24 舷側距離 40m における深度別の 1kW あたりの PFD 積分値

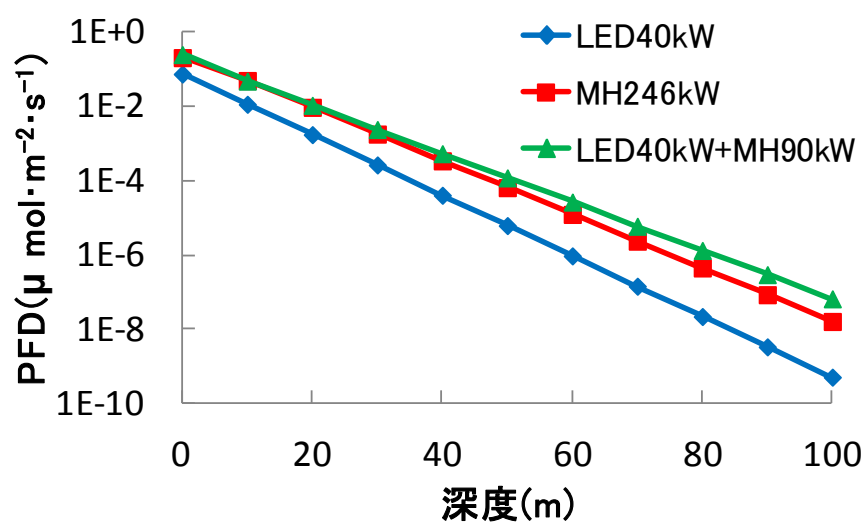


図 3-25 舷側距離 80m における深度別の 1kW あたりの PFD 積分値

3-3 考察

ERG 測定の結果と漁灯光測定データとの照合により求めた、スルメイカが漁灯光を感知できる限界深度は、その深度以浅においてスルメイカが漁灯光を感知し得ることを表し、その範囲が広いほど広範囲のスルメイカが漁灯光を感知し、船周に誘集できるものと考えられる。漁灯光感知範囲は漁灯の点灯条件で異なる傾向を示し、図 3-14 で示した LED40kW 点灯時では、舷側距離 0~60m の漁船近傍の範囲において感知限界深度は深くなり、舷側距離 60m より離れたところでは 10~20m と浅くなった。図 3-15 で示した MH246kW 点灯時では、舷側距離 40m において、LED40kW ほど感知限界深度は深くないが、舷側距離 60m より離れたところでも、感知限界深度は 40m~60m となり、LED40kW と比べ深くまで漁灯光が透過していた。また、舷側距離 40m において、深度 0m では MH246kW の PFD 積分値が LED40kW より大きかったのに対して、深度 40m では、MH246kW と LED40kW の PFD 積分値はほぼ同じ値になった。これは、MH 灯は全周に光を照射するが、LED 灯はパネル型で発光面方向にしか光を照射しない²⁵⁾という、漁灯光源の指向性によるものと考えられる。LED40kW+MH90kW 点灯時は、出力は MH246kW よりも低いですが、図 3-19 で示した感知限界深度は MH246kW に近い傾向を示したことから、スルメイカの漁灯光に対する感知限界深度は、光源の出力よりも指向性によって大きく変化するものと考えられる。

今回使用した MH 灯光の分光分布は、表層において 590nm の PFD が卓越していたが、海中を透過するにつれて 580nm より長波長側の減衰が著しく、500nm 付近の波長が比較的多く残った。LED は舷側距離による光量変化は大きいですが、深度 40m における分光分布では、580nm より長波長側の減衰以外では分布形状にあまり変化はみられなかった。LED 灯光の分光分布は、比較的透過率の高い、450nm と 480~580nm 付近の PFD が高かった。図 3-23 に示したように、舷側距離 40m で LED は 1kW あたりの PFD が最も大きかったことから、LED 灯光は漁灯の指向性と波長により、集中して入射している舷側距離 40m においては、MH 灯光よりも海中で減衰しにくいことが示唆された。

以上のことから、船体正横方向において、漁灯光感知範囲を拡大するには、

単一光源の出力を上げるよりも、発光特性の異なる光源を併用することが効果的であり、漁灯光の主波長には 490～500nm 付近の波長を用いることで、減衰によるエネルギーロスを抑制できるものと考えられる。

第 4 章 総合考察

2 章では ERG 測定から生体スルメイカの光覚閾値，分光視感度，光量別の応答振幅の特性についての知見を得た。3 章では漁灯条件，特に漁灯光源の指向性によって，スルメイカの漁灯光に対する感知限界深度が変化することがわかり，単一光源よりも発光特性の異なる光源の併用が，照射範囲と 1kW あたりの PFD から効率的であると考えた。総合考察では，スルメイカの光感覚が生息域における光環境およびイカ釣り漁船周囲における光環境に対して，どのような役割を果たしているのかを考察し，イカ釣り漁灯に有効な分光発光特性について提言した。

図 4-1 に，舷側距離 40m，深度 40m における漁灯光の分光分布を，PFD の最大値を 1 とする相対値で表し，分光視感度の近似曲線と重ねて図示した。図 4-1 において，MH246kW と LED40kW+MH90kW の分光分布は，ピークが 506nm となり，分光視感度と重なる傾向を示した。LED40kW においては，450nm のピークが多く残っているが，蛍光体の部分の波長(480～680nm)については，MH246kW，LED40kW+MH90kW と同様に，ピークが 506nm となった。このことから，スルメイカが漁灯光を感知できる深度には，同種が高い感度を示す波長ほど透過しやすいことが示唆され，490～500nm 付近に漁灯光の主発光波長を設定することが，漁灯光として有効であると言える。Hara et al.⁶⁾は，スルメイカの視物質レチノクロームの発色団であるオールトランスレチナールに，560nm より長波長側の光を照射すると，スルメイカのもう一つの視物質ロドプシンの発色団である 11 シスレチナールに異性化し，光照射によって分解されたロドプシンが回復するとしている。図 2-22 に示した分光視感度をみると，スルメイカは 560nm 付近の波長に対して高い感度を示さないが，図 3-11 に示した海水の分光透過率をみると，560nm 付近の波長の透過率は約 91%であり，図 3-20，3-21 に示した漁灯光の海中分光分布をみると，長波長側の波長の中では比較的多く残っていることがわかる。このことから，漁灯の発光波長選択では，スルメイカが高い感度を示し，海中に透過しやすい 490～500nm の波長を含む灯光と，視物質の再生を促す 560nm 付近の波長を含む灯光を用いることで，灯光によるスルメイカの行動制御効果を長時間維持し得る可能性があるものと考えられる。

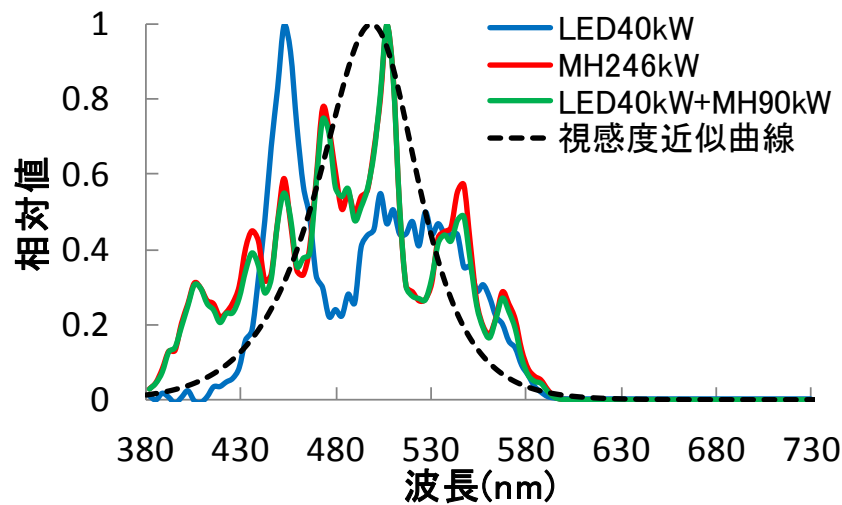


図 4-1 漁灯光の分光分布とスルメイカの分光視感度(舷側距離 40m, 深度 40m, 相対値)

図 4-2 に 3 章の石川県小木沖で測定した天空光について、深度 25m ごとの海中分光分布を相対値で表し、スルメイカの分光視感度と合わせて図示した。図 4-3 には、スルメイカの分光閾値と天空光の海中分光分布を示した。

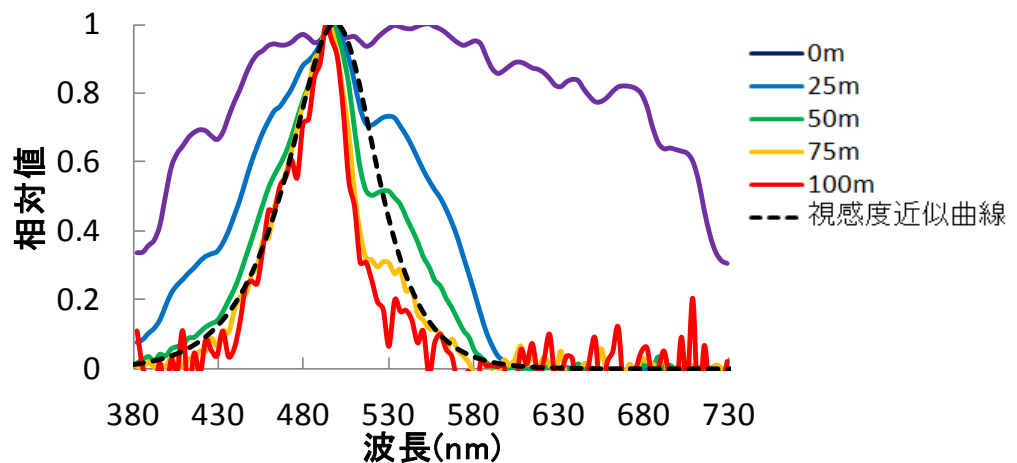


図 4-2 スルメイカの分光視感度と天空光の海中分光分布の相対値

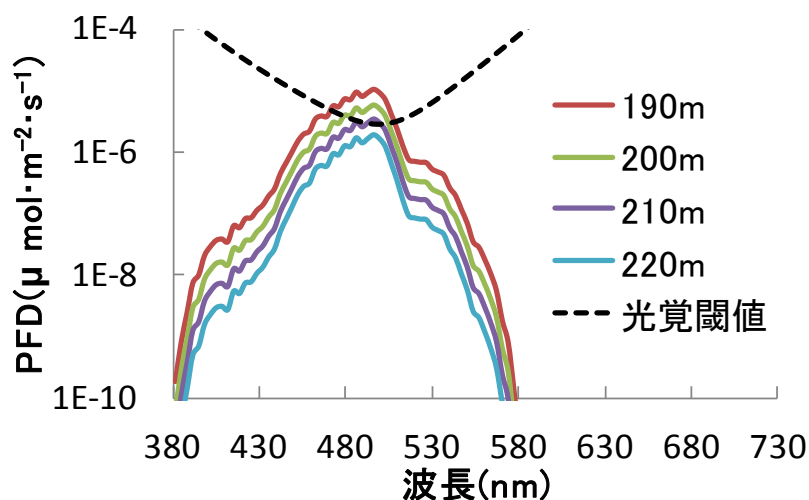


図 4-3 スルメイカの光覚閾値と天空光の海中分光分布

図 4-2 において、海面では天空光は 380～730nm にかけて幅広い分光分布を示したが、深度が深くなるにつれて、580nm より長波長側は著しく減衰し、深度 50m 以深では、分光分布はスルメイカの分光視感度とほぼ重なる傾向を示した。また、図 4-3 において、本研究から得られたスルメイカの分光閾値から、スルメイカは 200～210m まで透過した太陽光を感知できることが示唆された。川端²⁶⁾は、三陸北部海域において、日中のスルメイカは大陸棚縁辺(深度 200m)付近に高密度で分布すると報告しており、この深度においても、スルメイカは天空光を感知していると考えられる。2 章の光量別の LED 刺激光に対する応答振幅(図 2-32)において、PFD 積分値が $0.01 \sim 1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ の範囲で応答振幅が著しく変化し、この光量範囲において光量の変化を顕著に感知していることが示唆された。 $0.01 \sim 1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ という光量範囲を、図 3-10 に示した天空光の PFD 積分値と深度との関係からみると、深度 55m～110m における天空光の PFD 積分値に相当した。この深度は、日本海沖合漁場における日中のスルメイカの遊泳深度が 50～100m という報告⁴⁾とほぼ一致し、スルメイカは遊泳深度における光量変化を顕著に感知しているものと推察された。

漁灯点灯時に、PFD 積分値が $0.01 \mu \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ となる深度と感知限界深度を、3つの漁灯条件について図 4-4 に示した。PFD 積分値が $0.01 \mu \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ となる深度は、どの漁灯条件においても 60m 以浅となった。漁灯条件の中では、LED40kW が最も浅く、MH246kW と LED40kW+MH90kW はほぼ同様の傾向を示した。ただし、舷側距離 40m においては、LED40kW と LED40kW+MH90kW の場合、PFD 積分値が $0.01 \mu \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ となる深度が深くなる傾向を示した。スルメイカは図 4-4 において破線で示された深度以浅において、応答振幅の変化が大きくなり、コントラスト視、形態視覚に優れ²¹⁾、餌生物や擬餌針を感知しやすいものと考えられる。

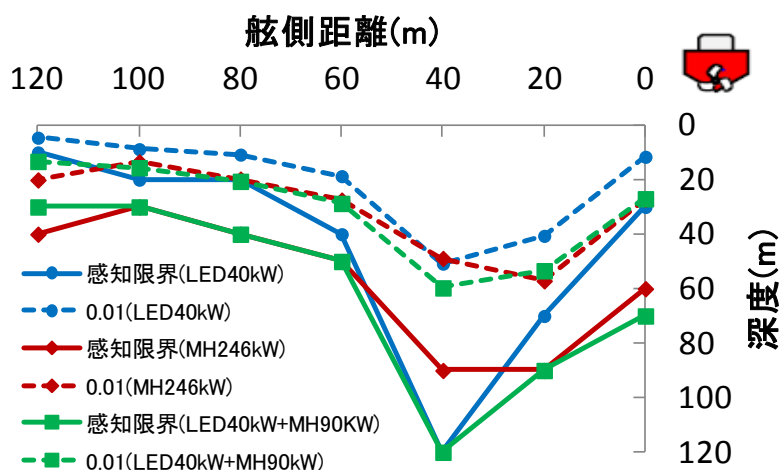


図 4-4 PFD 積分値が $0.01 \mu \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ となる深度

今後の課題としては、スルメイカが擬餌針を感知しやすいと考えられる、漁灯光の PFD 積分値が $0.01 \sim 1 \mu \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ となる深度が、漁灯の発光波長、出力、照射方向などによってどのように変化し、またその光量範囲において、スルメイカがどのような行動をとるかについて知見を深める必要がある。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にお世話になりました。まず、研究指導をしてくださった稲田博史先生に心から感謝申し上げます。実験に臨む際や結果に関する御助言には、自分一人では思いつかなかった点もあり、そのおかげでより良い研究内容にすることができました。これからは、先生から教わった、一か所にとらわれないものの見方・考え方をもって、様々なことに取り組んでいきたいと思います。魚群制御学研究室の有元貴文先生、秋山清二先生には、ゼミにおいて研究内容について指導して頂いただけでなく、授業や実習においてもお世話になりました。本当にありがとうございました。

鹿児島大学の安樂和彦先生、水田 敬先生には、ERG 測定 of 技術を直接ご教授して頂き、また実験でトラブルがあった際にも丁寧に対応して頂き、本当にありがとうございました。おかげさまで、スルメイカの ERG 測定について多くの知見を得ることができました。

実験施設を提供してくださった、北海道大学の桜井泰憲先生、松井 萌様はじめ同研究室の皆様、藤本信治専務をはじめとする株式会社オホーツク活魚の皆様、第三太喜丸の井上太喜船頭、実験用のサンプルを提供してくださった豊進丸の佐藤豊次船頭、第二八正福丸の森坂芳雄様はじめ森坂漁業部の皆様に厚く御礼申し上げます。今回の研究結果が皆様の研究活動や操業において役立てば幸いです。

そして最後に、同研究室先輩の津田 理院生、小泉慎太朗院生、富永明日翔院生、市原みどり院生、後輩の内堀湧太院生、斉藤草一院生、丹澤俊介院生、大谷真司学生、森田龍之介学生、鈴木由美子学生には、実験のサポートだけでなく、研究合宿中の生活、大学におけるゼミや実験など、多くの場面で支えていただきました。本当にありがとうございました。皆様の積極的に研究に臨む姿勢が励みになりました。研究活動において辛い場面もありましたが、お互いの研究活動をサポートするなど切磋琢磨し合うことで、3年間にわたる研究活動をとて有意義にすることができました。

本研究を通して、多くの方々のご協力・ご指導頂きました。心から感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 田内雅規, 金子章道. 電氣的応答から見た視細胞の性質. 「眼と電気生理」(三島濟一, 塚原 勇, 植村恭夫編) 金原出版株式会社, 東京. 1980; 1-12.
- 2) 小林 博. ERG と魚眼の機能. 「魚類生理」(川本信之編) 恒星社厚生閣, 東京. 1970; 452-461.
- 3) 稲田博史. 漁灯の要求仕様と使用技術. 「漁灯を活かす技術・制度の再構築へ」(稲田博史, 有元貴文, 長島徳雄, 飯田浩二編) 恒星社厚生閣, 東京. 2010; 9-25.
- 4) 四方崇文. イカ釣り漁業. 「漁灯を活かす技術・制度の再構築へ」(稲田博史, 有元貴文, 長島徳雄, 飯田浩二編) 恒星社厚生閣, 東京. 2010; 121-133.
- 5) 高山 剛. スルメイカ *Todarodes pacificus* の対光行動とイカ釣り漁業の漁獲過程に関する研究. 博士研究論文. 東京海洋大学. 東京. 2014.
- 6) Hara T, Hara R. Retinochrome and Rhodopsin in the Extraocular Photoreceptor of the Squid, *Todarodes*. *J. GEN. PHYSIOL* 1980; **75**: 1-19.
- 7) 原 富之, 原 黎子. 頭足類網膜のレチノクローム. 動物学雑誌 1975; **84**: 12-22.
- 8) 船津保浩, 川崎賢一, 臼井一茂, 仲手川 恒, 清水俊治, 阿部宏喜. マグネシウムイオンの鎮静作用を利用したヤリイカとスルメイカの活輸送, とくに輸送後の冷凍および冷蔵試料との品質の比較. 日本水産学会誌 2007; **73**: 69-77.
- 9) Bilotta J, Saszik S, Sutherland SE. Rod Contribution to the Electroretinogram of the Dark-Adapted Developing Zebrafish. *DEVELOPMENTAL DYNAMICS* 2001; **222**: 564-570.
- 10) Govardovskii VI, Fyhrquist N, Reuter T, Kuzmin DG, Donner K. In search of the visual pigment template. *Vis Neurosci* 2000; **17**: 509-528.
- 11) Normann RA, Werblin FS. Control of Retinal Sensitivity I. Light and Dark Adaptation of Vertebrate Rods and Cones. *THE JOURNAL OF GENERAL PHYSIOLOGY* 1974; **63**: 37-61.

- 12) 奥埜良信, 梁瀬 健. 腹足類アマオブネ (*Nerita albicilla*) の基眼における電気応答. 大阪教育大学紀要 1976; **24**: 167-174.
- 13) 篠田博之, 藤枝一郎. 「色彩工学入門 定量的な色の理解と活用」森北出版株式会社, 東京. 2007.
- 14) 北村章二. カサゴの ERG (網膜電図) - I 暗順応時における刺激と反応との関係. 養殖研究所研究報告 1987; **12**: 53-60.
- 15) 小林 博. 水産動物における光感覚と明度の関連. 日水誌 1972; **38**: 913-920.
- 16) 戸枝宏伝. サンマの対光行動と光感覚の漁獲過程への応用. 修士研究論文. 東京海洋大学. 東京. 2012.
- 17) 遠藤将一. 魚類の視感度の計測と集魚灯への応用. 修士研究論文. 鹿児島大学. 鹿児島. 2010.
- 18) Smith VC, Pokorny J. Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500nm. *Vision Research* 1975; **15**: 161-171.
- 19) Naka KI, Rushton WAH. S-POTENTIAL FROM LUMINOSITY UNITS IN THE RETINA OF FISH (CYPRINIDAE). *J. Physiol* 1966; **185**: 587-599.
- 20) Dowling JE, Ripps H. S-Potentials in the Skate Retina Intracellular recordings during light and dark adaptation. *J. GEN. PHYSIOL* 1971; **58**: 163-189.
- 21) Eguchi E, Horikoshi T. Comparison of stimulus-response (V-logI) functions in five types of lepidopteran compound eyes (46 species). *J Comp Physiol A* 1984; **154**: 3-12.
- 22) Kobayashi H. A comparative study of electroretinogram in fish, with spectral reference to ecological aspects. *J. Shimonoseki Coll. Fish* 1962; **11**: 407-538.
- 23) 佐藤克哉. イカ釣り漁業における LED 漁灯の操法構築に関する研究. 修士研究論文. 東京海洋大学. 東京. 2010.

- 24) 小池裕幸. 分光測定的基础. 低温科学. 2009; **67**: 431-447.
- 25) 佐野栄作. LED 灯の特長. イカ釣り LED 漁灯活用ガイド. 2013; 54-55.
- 26) 川端 淳. 三陸北部海域におけるスルメイカの分布様式と生息環境について. イカ類資源研究会議報告. 水産総合研究センター日本海区水産研究所. 新潟. 2004.

巻末資料 1 ニガリと海水の混合液における Mg^{2+} 濃度について

スルメイカはマグネシウムイオンによって沈静状態になる⁸⁾ことが知られているため、ニガリを麻酔として用いて、スルメイカを不動化した。

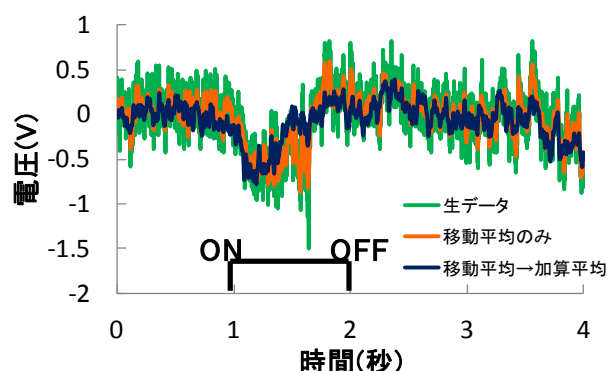
使用したニガリ：天海のにがり（赤穂化成株式会社）

成分：100mℓあたりマグネシウム 950mg (0.95g)

マグネシウムは 1mol で 24g なので、ニガリ 100mℓ中には $0.95/24 \div 0.04\text{mol}$ のマグネシウムが含まれている。900mℓの海水に 100mℓのニガリを加えることで、マグネシウムのモル濃度が $0.04\text{mol}/\ell$ の混合液ができる。マグネシウムのモル濃度を $0.05\text{mol}/\ell$ とした際にスルメイカの不動化を確認したため、混合液中のニガリ濃度は $0.05/0.04 \times 100 = 12.5\%$ とした。

巻末資料 2 データ処理方法

補足図 1 に ERG 測定データにおける平均処理の有無による応答波形の変化について示した。

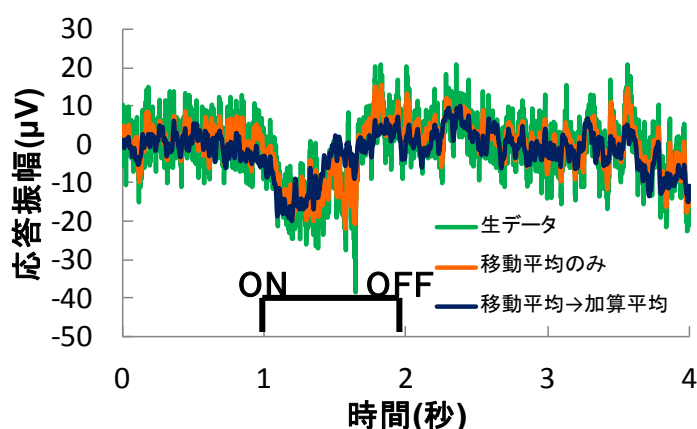


補足図 1 平均処理によるノイズ量の変化 (493nm, ND8 × 6 条件)

まず、1/1000 秒ごとに記録している測定データに、ある点から前後区間 (本研究においては前後 5 区間の移動量 11) のデータを平均する移動平均処理を施すことによって、ノイズを軽減した。次に、1 セットの測定で記録した 2 回分の反応について、刺激光照射前後の同じ区間を取り、加算平均処理を施すことによってノイズを軽減した。

補足図 1 において、平均処理前の測定データは刺激光照射前に $\pm 0.5\text{V}$ 程度のデータのブレがあった。まず測定データ全体に移動平均処理、それから 2 回分の反応を加算平均処理することで、 $\pm 0.1\text{V}$ 程度までノイズを軽減した。

また、この電位変化の測定値はアンプによって増幅したものなので、これを増幅前の値に直す必要がある。アンプには $50\mu\text{V}$ 、 $1000\mu\text{V}$ の信号を出すスイッチがあり、これを使い増幅された $50\mu\text{V}$ 、 $1000\mu\text{V}$ の信号を記録し、ERG 測定値との比から計算によって測定値を増幅前の値に変換した。補足図 2 において、刺激光照射時の応答振幅は約 $-20\mu\text{V}$ であった。



補足図 2 増幅前の電位変化 (493nm, ND8 × 6 条件)